
М.И.БЛУДОВ
БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ



М. И. БЛУДОВ

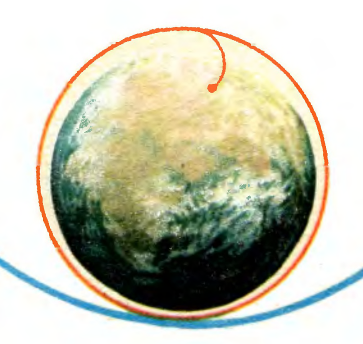
БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ

Часть I

Учебное пособие
для учащихся

Рекомендовано
Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР

Издание третье, переработанное
Под редакцией
Л. В. ТАРАСОВА



МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1984

ББК 22.3
Б70

Рецензенты:
кандидат технических наук *О. В. СМОЛИН*,
учитель физики *А. Ю. ВОЛОХОВ*

Блудов М. И.
Б70 Беседы по физике. Ч. I. Учеб. пособие для учащихся/Под ред. Л. В. Тарасова.— 3-е изд., перераб.— М.: Просвещение, 1984.— 207 с., ил.

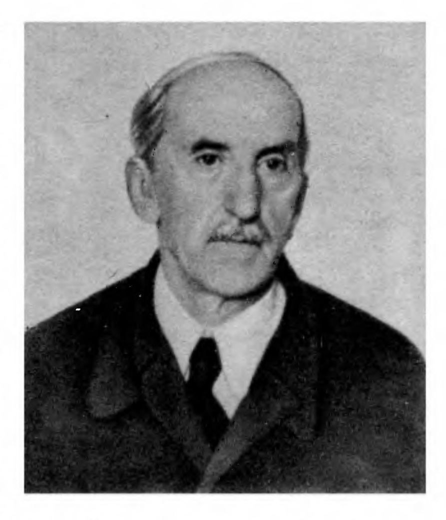
«Беседы по физике» — книга для внеклассного чтения учащихся старших классов средней школы. В I части книги в форме бесед рассказывается о механике, молекулярной физике и термодинамике.

Б $\frac{4306021100-403}{103(03)-84}$ инф. письмо — 83



ББК 22.3
53

МИХАИЛ ИВАНОВИЧ БЛУДОВ
(1890—1974)



Издательство «Просвещение» выпускает в свет третье издание «Бесед по физике» М. И. Блудова. Эти книги можно смело поставить в один ряд с прославленными книгами Я. И. Перельмана «Занимательная физика». В трех частях «Бесед» автор в интересной и доступной для учащихся форме излагает многие вопросы школьного курса физики, только на более высоком научном уровне, широко используя историю науки, философию и даже художественную литературу. В «Беседах» содержатся также и некоторые вопросы, выходящие за пределы школьной программы. Так, например, автор очень доходчиво, занимательно и вместе с тем глубоко и серьезно описывает такие сложные и тонкие физические явления и понятия, как эффект Мёссбауэра, эффект Черенкова, энтропия и др.

Читая «Беседы по физике», поражаешься огромной эрудиции автора, отличному знанию физики и многих других областей науки. Для учителей физики «Беседы» М. И. Блудова являются образцом доступного и интересного изложения самых сложных вопросов физики.

Кто же автор этих замечательных книг?

Михаил Иванович Блудов — учитель физики, не имевший ни ученого звания, ни ученой степени. На одном экземпляре своей книги, присланной мне, он написал: «Дорогому Александру Васильевичу на память от влюбленного в физику автора». Ему было тогда 75 лет. Любовь к физике у нас была обоюдной, и она сплачивала нашу многолетнюю дружбу.

Родился М. И. Блудов в 1890 г. в г. Владимире. Там же в 1908 г. окончил с серебряной медалью гимназию. Учась в гимназии, Михаил Иванович увлекался опытами по физике и химии. Дома у себя он организовал физико-химическую лабораторию,

в которой работал он сам и многие его товарищи. В аттестате М. И. Блудова было отмечено, что он особенно отличался в латинском языке и истории. Латинский язык он действительно знал хорошо, даже в глубокой старости. В гимназии, кроме латинского языка, М. И. Блудов хорошо изучил немецкий и французский языки, а будучи уже студентом, свободно читал книги на английском языке. Любопытно, что в глубокой старости Михаил Иванович изучил древнегреческий язык настолько хорошо, что мог в подлиннике читать произведения Гомера.

По окончании гимназии М. И. Блудов выдержал труднейший конкурсный экзамен в Московское Императорское высшее техническое училище (ныне МВТУ им. Баумана) на химическое отделение. Пятилетний курс этого училища он закончил за четыре года, получив диплом инженера-технолога. Но к инженерной работе Михаил Иванович не чувствовал призвания. Его привлекала преподавательская работа. Поэтому с дипломом инженера он начал свою трудовую деятельность с преподавания физики, химии и математики сначала в женской гимназии, а потом и в других учебных заведениях.

Великая Октябрьская социалистическая революция дала возможность М. И. Блудову широко раскрыть свой талант педагога и популяризатора науки.

«Беседы по физике» — только одна из больших работ М. И. Блудова, но самая ценная. Он является автором учебника по физике для техникумов, пособия для учителей «Преподавание физики в средних специальных учебных заведениях», многих статей и брошюр по преподаванию физики в техникумах и школах. Как опытный педагог, Михаил Иванович принимал участие в создании программ по физике и в разработке прогрессивных методов обучения.

Владея несколькими иностранными языками, М. И. Блудов перевел на русский язык ряд интересных книг по физике, в том числе «Маленькую физику» Г. Низе и «Физику» Л. Эллиота и У. Уилкокса.

Михаил Иванович творчески работал до глубокой старости. К сожалению, ему не удалось написать четвертую (заключительную) часть своих «Бесед по физике».

Член-корреспондент АПН СССР,
профессор А. В. ПЕРЫШКИН

К ЮНЫМ ЧИТАТЕЛЯМ КНИГИ

Зимний вечер. Трудовой день окончен: уроки на завтра приготовлены, домашние обязанности выполнены, вы даже успели побывать на катке или пробежаться на лыжах. Как приятно, наконец, отдохнуть дома, в тепле. Сядьте за стол, поближе к свету, и раскройте эту книгу, посвященную замечательной науке — физике. Возможно, книга заставит вас задуматься над тем, что ускользало раньше от вашего внимания, она перенесет вас мысленно и в Кембриджский университет, где учился и работал великий И. Ньютон, и в рабочий кабинет основоположника русской науки М. В. Ломоносова. Вас взволнует глубокая личная трагедия основателя закона сохранения энергии Роберта Майера, вам интересно будет познакомиться с рассуждениями гениального Сади Карно, который сумел, вопреки ошибочным представлениям о природе теплоты, вывести важнейший закон термодинамики.

Книга состоит из отдельных очерков, логически связанных друг с другом. Некоторые очерки написаны в форме бесед учащихся с учителем, споров, вспыхивающих во время занятий физического кружка, разговоров со старшими. Во время этих бесед ваши сверстники нередко попадают в затруднительное положение, пытаясь разрешить те или иные физические парадоксы. И вам будет предложено немало тем для бесед и споров с товарищами, а также для проведения несложных домашних опытов.

Одна из целей автора книги — желание пробудить у вас, читателей, интерес к вашей будущей профессии. Быть может, вы захотите стать железнодорожником, моряком, летчиком, строителем, архитектором, астрономом или геологом-разведчиком, подобно тем юношам и девушкам, мечты которых раскрываются в отдельных очерках книги.

Главное же назначение этой книги — быть книгой для чтения в помощь учебным занятиям. Физика — огромная наука. Естественно, что в данной книге невозможно было даже кратко отразить все многообразие вопросов, рассматриваемых в физике. Для книги были отобраны лишь некоторые вопросы, обычно затрудняющие учащихся. Эти вопросы затрагивают кинематику и динамику поступательного и вращательного движения, колебания маятника, статику, законы сохранения энергии и импульса, симметрию кристаллов, элементы молекулярно-кинетической теории и терминодинамики, физику газов и жидкостей.

Беседы неодинаковы по трудности содержания и по стилю. Читать их лучше всего одну за другой, но можно читать и выборочно. Не следует смущаться, если при первом чтении некоторые места покажутся вам трудными: к ним можно будет вернуться позднее, когда по мере изучения физики вы окажетесь более подготовленными к их пониманию. Возможно, что физические явления будут раскрываться перед вами не совсем в том порядке, в каком они обычно излагаются в учебниках. Желая показать то или иное явление в его естественном многообразии, автор часто отступает от строгих рамок школьной программы, имея в виду, что данная книга не будет единственным источником ваших знаний по физике.

МАТЕРИЯ, ДВИЖЕНИЕ, ЭНЕРГИЯ

(вместо введения)

Рассказывают, что однажды на общем приеме император Наполеон обратился к представленному ему немецкому философу Якоби с вопросом: «Что такое материя?» Не получив ответа, император повернулся спиной к озадаченному философу. Ответить на вопрос «что такое?» в форме краткого рапорта, которого, очевидно, ожидал император, не всегда легко и не всегда возможно.

В жизни мы постоянно имеем дело с различными предметами. Наблюдая и изучая их, мы приобретаем опыт, а через опыт постепенно познаем мир. Мы наблюдаем происходящие вокруг нас различные явления, осязаем предметы, ощущаем тепло и холод, и в нашем сознании постепенно складываются определенные представления. Так, подумав о снеге, мы представляем его себе белым, холодным, рыхлым; подумав об угле, мы представляем его плотным и черным, способным гореть.

Все в мире находится во взаимной связи. Снег, принесенный в теплую комнату, тает, из него образуется вода. На горячей плите воду можно довести до кипения и превратить в пар. Познавая и изучая последовательность и взаимосвязь явлений, исследователи открывают законы природы.

Началом всякого познания является вопрос «что такое?». Великий русский ученый, физиолог Иван Петрович Павлов считал, что каждое живое существо обладает способностью отзываться на внешнее раздражение. Он так и называл эту реакцию на внешнее раздражение «исследовательским» рефлексом, рефлексом «что такое?». «Если бы у животного не было этой реакции, то жизнь его каждую минуту, можно сказать, висела бы на волоске. А у нас этот рефлекс идет чрезвычайно далеко, проявляясь, наконец, в виде той любознательности, которая создает науку,

дающую и обещающую нам высочайшую, безграничную ориентировку в окружающем мире».

Первым шагом всякой науки является ответ на вопрос «что такое?». Ответить на такой вопрос — это значит выделить предмет или явление из множества других, подвести данное понятие под другое, более широкое. Вспомните какой-нибудь из вопросов, который вам задает обычно учитель в школе, например: «Что называется квадратом?» Вы отвечаете: «Квадратом называется такой параллелограмм, у которого все стороны равны, а углы прямые». Отвечая так, вы подвели понятие «квадрат» под более широкое — «параллелограмм» и, кроме того, указали, к какому виду параллелограммов относится квадрат, потому что ведь не всякий параллелограмм есть квадрат.

Возвращаясь к вопросу: «Что такое материя?», мы должны признать, что не существует более широкого понятия, которое бы включало в себя понятие материи. Вы можете приводить примеры различных материальных тел, некоторые из них будут твердые (камень), другие жидкие (вода, керосин), третьи газообразные (водород, кислород), но это будут только примеры материальных тел. Материя — это предельно широкое понятие.

Ответом на вопрос: «Что такое материя?» — является ленинское определение: «Материя есть то, что, действуя на наши органы чувств, производит ощущение; материя есть объективная реальность, данная нам в ощущении...»[1], «Мир есть движение этой объективной реальности»[2].

Мир, природа — φνσὶξ («фюзис») по-гречески. Отсюда произошло и название науки — физика. Так называл ее греческий философ Аристотель, написавший за две с лишним тысячи лет до нас первую «Физику».

«Физика» Аристотеля! При знакомстве с этой книгой воображение уносит нас в давно минувшие века, в Грецию эпохи завоевательных походов Александра Македонского, воспитанника и ученика великого Аристотеля. В то время как знаменитый полководец вел свои фаланги на Восток и древние царства падали к ногам победителя, его учитель, прогуливаясь в тенистых аллеях основанного им в Афинах лицея, учил своих учеников рассуж-

---

[1] Ленин В. И. Полн. собр. соч., т. 18, с. 149.
[2] Там же, с. 283.

дать о том, что такое мир, время, движение. В эту эпоху и была написана им «Физика».

Не подумайте, что «Физика» Аристотеля хоть сколько-нибудь похожа на современные учебники физики. Нет! В ней вы не найдете ни одного описания опыта или прибора, ни одного рисунка, ни одного чертежа, ни одной формулы. В ней — философские рассуждения о предмете, о месте, о времени, о движении вообще. «Так как природа есть начало движения и изменения, а предметом нашего исследования является природа, то нельзя оставлять невыясненным, что такое движение: ведь незнание движения необходимо влечет незнание природы» — так начинается глава о движении.

Надо признать, что многие суждения Аристотеля о движении оказались неверными. Так, например, Аристотель утверждал, что тело движется только до тех пор, пока на него действует другое тело. Движение брошенного камня или полет стрелы, выпущенной из лука, он объяснял «подталкивающим действием» воздуха, врывающегося в пустоту, которая образуется позади движущегося тела. «Все движущееся должно приводиться в движение чем-нибудь»,— писал он и тем показывал, насколько далек был древний мир от понимания закона инерции.

Известны ошибки Аристотеля и во взглядах на падение тел. Этот вид движения Аристотель относил к «естественным движениям», не нуждающимся в двигателе, а происходящим в силу «естественного» стремления всякого тела занять «свое место». Такое место, по Аристотелю, для тяжелых тел, например камня, внизу, а для легких, например дыма, вверху. Подчиняясь этому стремлению, тяжелые тела падают вниз и тем быстрее, чем они тяжелее. Лишь через двадцать веков это утверждение Аристотеля было опровергнуто Галилеем.

Несмотря на все эти ошибки, мы ценим в Аристотеле глубокого мыслителя, одного из основателей науки о природе.

Под движением Аристотель понимал всякое изменение, происходящее с телом. Более сложный вид движения, по утверждению Аристотеля, включает в себя предыдущий, более простой. Но в подтверждение он не приводил никаких примеров. Поэтому, чтобы сделать понятной мысль Аристотеля, воспользуемся примерами из современной физики.

Самым простым является механическое движение, связанное с изменением места или положения тела по отношению к другим

телам. Кроме механического движения, существуют более сложные виды движения: тепловое, электрическое, внутриатомное. Такие движения более сложны уже потому, что представляют собой движение невидимых глазу частиц, а главное, потому, что происходят они по законам, отличающимся от законов механики. Тепловое движение, например, представляет собой движение молекул, из которых состоит тело. Движение одной отдельно взятой молекулы есть движение, для которого в определенной степени справедливы законы механики, но движение всего множества молекул, составляющих какое-нибудь тело (например, 27 000 000 000 000 000 000 молекул, которые содержатся в 1 $см^3$ любого газа при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст.), вследствие хаотичности их движения нельзя описать по законам механики. Здесь приходится прибегать к законам статистики, теории вероятности, в некоторых случаях и к квантовой физике.

Различные виды движения могут превращаться друг в друга. Здесь мы подходим к другому важнейшему понятию физики — к энергии. Понятие энергии вошло в физику лишь тогда, когда было установлено, что один вид движения может перейти в другой, хотя слово «энергия» можно встретить значительно раньше. Тот же Аристотель писал об энергии, понимая под этим словом движение, еще не завершенное. Слово «энергия» без достаточной ясности употреблялось и Галилеем. Тогда под этим термином смешивали два понятия: «энергия» и «сила».

Термин «энергия» в современном понимании появился лишь в XIX веке. Английский физик Т. Юнг в «Лекциях по натуральной философии» (1807 г.) определил энергию как работоспособность движущихся масс, измеряемую произведением массы тела на квадрат его скорости. В 1809 году французский ученый Г. Кориолис уточнил это определение и ввел известную вам формулу $\frac{mv^2}{2}$. Однако понятие энергии длительное время распространялось только на механическое движение.

В середине XIX века, после появления работ Майера, Джоуля, Гельмгольца, когда был установлен закон сохранения и превращения энергии, понятие энергии распространилось на другие виды движения и окончательно утвердилось.

Большое значение для выяснения физического содержания понятия энергии имеют работы русского физика Николая Алексеевича Умова (1846—1915). Умов в 1874 году защитил диссер-

тацию «Уравнения движения энергии», в которой изложил основы учения о движении энергии.

В настоящее время понятие энергии является одним из основных понятий физики. Это понятие неразрывно связано с представлением о превращении одной формы движения материи в другую (при сохранении общего количества энергии). Пытаясь дать определение энергии, мы вынуждены обращаться к примерам превращения одних видов движения в другие, отмечая при этом, что понятие энергии неразрывно связано с движением, вечным свойством материи.

Новые научные открытия дают возможность использовать новые виды энергии. В свою очередь новые технические достижения, вызванные растущими потребностями человека, побуждают науку к новым открытиям. Вам, юные читатели, предстоит перешагнуть через порог нового столетия, в 2000 год. Вам предстоит освоить энергию недр, солнечных лучей, приливов и отливов, морских волн. Когда будет осуществлено управление термоядерной энергией, тогда в десятки тысяч раз увеличится количество вырабатываемой электроэнергии по сравнению с современным уровнем. Вы будете жить в этом преображенном мире. Но новая наука, новая техника делается людьми. Вы должны стремиться овладеть новой наукой, и в первую очередь физикой.

ЧЕГО МНОГИЕ НЕ ЗНАЮТ О СКОРОСТИ

КАК ПРОИЗНОСИТЬ БУКВУ v

Знаете ли вы, почему для обозначения скорости принята латинская буква v (вэ), ускорения — a (а), пути — s (эс), времени — t (тэ)?

Хотя для обозначения физических величин можно было бы выбрать любые буквы любого алфавита, однако во многих случаях применение латинских букв для этой цели оказалось весьма удачным. В самом деле, латинский алфавит принят в большинстве стран мира, корни латинских слов перешли в такие распространенные языки, как французский, английский, испанский. Наконец, и для тех, кто не владеет иностранными языками, обозначение некоторых физических величин начальными буквами их латинских названий (v — velocitas — скорость, a — acceleratio — ускорение, t — tempus — время) тоже удобно, так как и в русском языке много технических терминов и слов с такими же корнями. Например, «акселератор» — педаль (чаще — ножной рычаг), нажимом на которую регулируется поступление горючей смеси в цилиндр двигателя внутреннего сгорания, в результате чего изменяется скорость движения автомобиля; «велосипед» — сложное слово: velox — скорый и pedes — ноги. Таким образом, латинская буква напоминает о физическом смысле обозначаемой ею величины.

Чтобы родство условного обозначения скорости со знакомым словом «велосипед», а значит, и правильное произношение символа v запомнилось лучше, приведем выдержку из интересной книги Л. Успенского «Слово о словах» (рассказ «Велосипед в XVI веке»): «...В одной из грамот конца XVI века мне встретилась такая примерно удостоверительная помета: «А к сей рукописи руку приложили Ивашко Кузнецов, да Ивашко Зыбин,

да Глупой, Борисов сын Перепел, да погоста Микифорова дьячок Игнатий Велосипедов».

Как? В XVI столетии, за четыре века до нашего времени, во дни царя Бориса Годунова или еще раньше, жил на Руси в глухом погосте Микифорове человек, носивший фамилию Велосипедов?! Мы же знаем, что машина «велосипед» изобретена только в XIX веке и самое слово «велосипед» появилось вместе с нею»... Автор дает далее объяснение: в старину знание латинского языка считалось признаком учености, поэтому часто церковные грамотеи, стыдясь своих простонародных фамилий, заменяли таковые латинскими переводами их. Так появились Сперанские (вместо Надеждины), Беневоленские (Доброхотовы), Бенедиктовы (Краснобаевы) и т. д. Возможно, что какой-нибудь скромный попик или дьячок переделал свою простецкую фамилию Быстроногов в Велосипедов.

«МАТЕМАТИКА СТРЕЛОК»

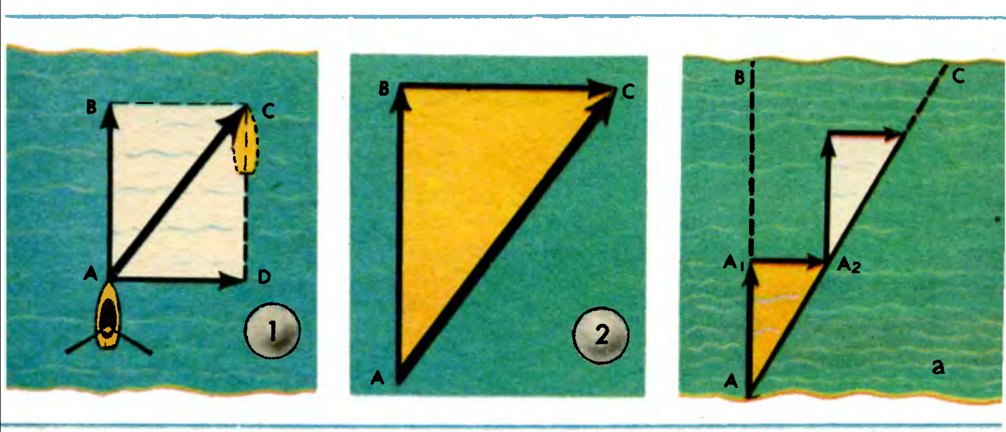
Вероятно, вам известен вопрос-шутка: «Как правильнее сказать: три да четыре суть пять или три да четыре есть пять?» И когда под веселый смех окружающих вопрошаемый выбирает второй вариант, вы, к его великому смущению, напоминаете, что согласно арифметике три да четыре будет семь, а не пять. Спрашиваемый попал в ловушку, так как подчеркнутой интонацией слов «суть» и «есть» его внимание было отвлечено от арифметики в сторону грамматики.

Но подождите торжествовать, сейчас и вы узнаете, что три да четыре не всегда в сумме дает семь, что правильный ответ может быть и пять, и вообще любое число между единицей и семью, в зависимости... от угла между слагаемыми, конечно, в том случае, если «три» и «четыре» представляют собой так называемые векторные величины.

Дело в том, что величины бывают скалярные и векторные. Первые характеризуются только числом, например длина, объем, время. Вторые характеризуются не только числом, но и направлением.

Скалярные величины складываются арифметически (три кубических метра да четыре кубических метра всегда будет семь кубических метров). Векторные величины складываются геометрически.

Поясним это на простом примере (см. рис. 1). Поперек реки плывет лодка. Если бы вода в реке была неподвижна, то лодка перемещалась бы каждую секунду, например, на $|AB|=4$ м. В действительности же вода в реке течет и сносит лодку по течению за то же время, скажем, на $|AD|=3$ м. В результате лодка оказывается в точке C. Каково будет перемещение лодки за секунду по отношению к берегу в текущей воде? Перемещение есть величина векторная. В самом деле, ведь важно знать не только расстояние, на которое сместится лодка, но и направление перемещения.



Искомое перемещение лодки показано на рисунке 1 отрезком AC. Вектор $\overrightarrow{AC}$ есть сумма векторов $\overrightarrow{AB}$ и $\overrightarrow{AD}$:

$$\overrightarrow{AB}+\overrightarrow{AD}=\overrightarrow{AC}.$$

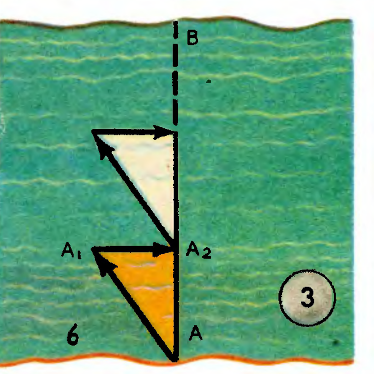
Над векторными величинами в отличие от скалярных принято ставить стрелку. На чертеже векторы обозначают не простым отрезком, а отрезком направленным — в виде стрелки, указывающей, куда направлен вектор. Поскольку в рассматриваемом примере слагаемые векторы направлены под прямым углом друг к другу, то для нахождения длины результирующего вектора можно воспользоваться известной теоремой Пифагора. Таким образом,

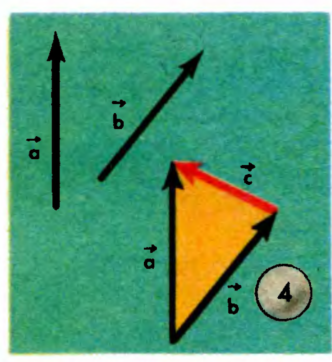
$$|AC|=\sqrt{|AB|^2+|AD|^2}=\sqrt{16+9}\text{ м }=5\text{ м}.$$

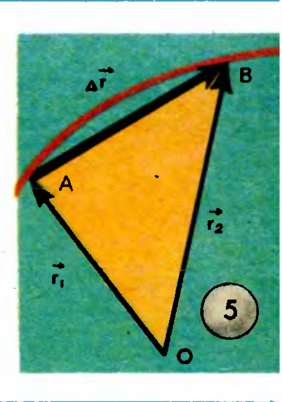
На рисунке 1 показано сложение векторов по правилу параллелограмма. Слагаемые векторы являются сторонами парал-

лелограмма, а результирующий вектор есть диагональ параллелограмма. Сложение векторов можно производить и иначе — по правилу треугольника. Такой способ сложения векторов показан на рисунке 2. К концу вектора $\overrightarrow{AB}$ приставляют начало вектора $\overrightarrow{BC}$ и затем соединяют вектором $\overrightarrow{AC}$ начало первого вектора с концом второго. Вектор $\overrightarrow{AC}$ есть сумма векторов $\overrightarrow{AB}$ и $\overrightarrow{BC}$. Нетрудно сообразить, что оба правила сложения векторов приводят к одному и тому же результату.

На рисунках 1 и 2 угол между слагаемыми векторами равнялся 90°. В общем случае угол между слагаемыми векторами







может быть каким угодно. Чем меньше этот угол, тем, очевидно, больше длина результирующего вектора (при заданных длинах слагаемых векторов). Если рассматриваемый угол равен нулю, длина результирующего вектора максимальна; она равна арифметической сумме длин слагаемых векторов. Если же этот угол равен 180° (слагаемые векторы направлены в противоположные стороны), длина результирующего вектора минимальна; она равна арифметической разности длин слагаемых векторов. При этом результирующий вектор направлен в сторону вектора большей длины.

Для лучшего закрепления сказанного о сложении векторов представим ту же задачу в такой форме. Пловец пытается быстро переплыть реку шириной 200 м. Скорость пловца в стоячей воде равна 20 м/мин. Пловец старался плыть перпендикулярно течению, но течение реки каждую минуту относило его на 12 м от цели. Поэтому он достигает противоположного берега в точке

C (рис. 3, *а*). Если же пловец будет стремиться плыть под некоторым углом к линии AB так, что течение все время будет сносить его на эту линию, то, плывя с той же скоростью по отношению к воде, он окажется в конце концов в точке B (рис. 3, *б*). В каком случае пловец скорее достигнет противоположного берега? Рассчитав, вы, к своему удивлению, получите такие ответы: в первом случае переправа займет 10 мин, а во втором 12,5 мин. Кратчайшая дорога не всегда скорейшая!

В следующей беседе вам понадобится умение вычитать векторы. Покажем, как это надо делать (см. рис. 4). Пусть из вектора $\vec{a}$ надо вычесть вектор $\vec{b}$. Приставьте начало вектора $\vec{b}$ к началу вектора $\vec{a}$, сохраняя, конечно, их направления. Затем проведите вектор $\vec{c}$ от конца вектора $\vec{b}$ (вычитаемого) к концу вектора $\vec{a}$ (уменьшаемого). Полученный вектор $\vec{c}$ и есть разность векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$, в чем легко убедиться, проверив вычитание сложением:

$$\vec{b}+\vec{c}=\vec{a}.$$

ПОЧЕМУ СКОРОСТЬ — ВЕКТОР

Во многих книгах по физике можно встретить утверждение, что скорость есть вектор. Между тем внимательный взгляд на формулу скорости равномерного движения $v=\frac{s}{t}$ поставит в тупик вдумчивого ученика. И путь, и время — величины скалярные, поэтому непонятно, каким образом после операции над скалярными величинами получается величина векторная. Оказывается, приведенная формула показывает, как вычислить значение скорости, и ничего не говорит о направлении скорости.

В учебниках физики дается более строгое понятие скорости, для определения которой надо знать перемещение точки и время перемещения. В отличие от пути перемещение есть величина векторная, потому что включает в себя ответ на два вопроса: на сколько переместилась точка (тело) и в каком направлении она переместилась? Рисунок 5 поясняет сказанное для движения точки по криволинейной траектории. Положение материальной точки на траектории определяется радиус-вектором $\vec{r}_1$, т. е. вектором, проведенным от некоторого, произвольно выбранного начала координат O к данной точке.

Если точка переместится из A в B, то радиус-вектор для ее нового положения будет $\vec{r_2}$, а разность их по правилу вычитания векторов будет равна вектору $\Delta\vec{r}$, направленному от A к B. Эта разность характеризует изменение положения точки в пространстве, т. е. ее перемещение. Отношение $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ дает среднюю скорость перемещения на участке AB. Уменьшая все больше и больше промежуток времени Δt, а вместе с ним и $\Delta\vec{r}$, мы все ближе будем подходить к правильному определению скорости в данной точке в данный момент.

Интересно отметить, что в английских учебниках физики различают два понятия: *velocity* — скорость (векторная величина) и *speed* — быстрота движения (скалярная величина). Корень последнего термина мы встречаем в названии прибора для определения скорости автомобиля или мотоцикла — спидометр.

СРЕДНЯЯ И МГНОВЕННАЯ СКОРОСТИ

Сквозь снежную метель мчится, сверкая огнями, экспресс. Вдруг поезд резко затормозил и остановился перед красным сигналом светофора. Никто из пассажиров, вероятно, и не подумал, что именно этот сигнал предупредил катастрофу: без него экспресс на полном ходу врезался бы в товарный поезд, оказавшийся на пути движения экспресса.

Прислушаемся к разговору, который происходит в одном из купе между двумя мальчиками и их папой, инженером.

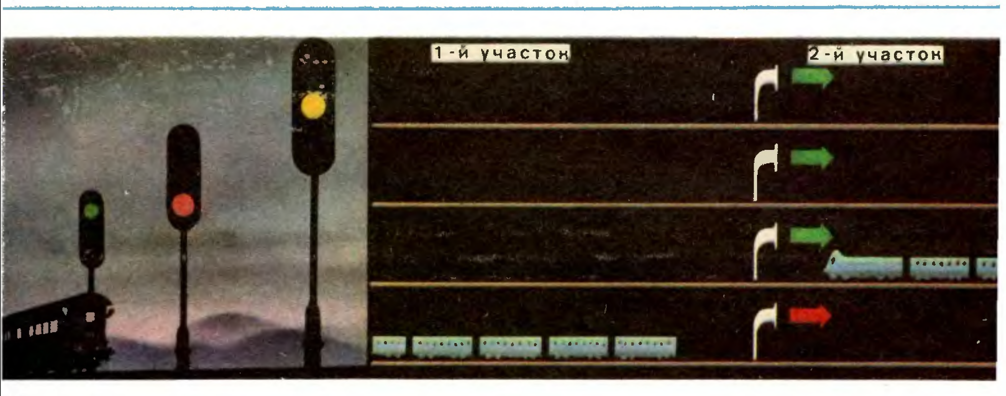
— Ничего не видно! Кажется, мы стоим в поле. Почему, папа?

— Очевидно, мы стоим перед красным сигналом, запрещающим движение. Участок перед нами, видимо, занят. Видишь ли, весь путь разбит на участки, на границах которых находятся светофоры, они обеспечивают безопасность движения (рис. 6). При зеленом огне светофора машинист не снижает скорости движения поезда. Желтый свет требует снизить скорость, чтобы успеть затормозить и остановить поезд, если следующий сигнал окажется красным.

Володя (мальчик постарше, вмешиваясь в разговор). Игорь! Помнишь, мы дома спорили, что такое средняя скорость. Ты еще никак не мог понять этого.

— Мы учили, что скорость тела можно узнать, разделив пройденный путь на время его прохождения. Предположим, что на прохождение пути в 900 км от Москвы до Кирова, к которому мы подъезжаем, потребовалось 14 ч. То, что получится от деления пути на время, и будет, по-моему, средняя скорость.

— И притом «участковая», или «коммерческая», скорость с учетом времени стоянок,— сказал папа.— Вот если бы ты рассмотрел участок Москва — Александров, который наш поезд прошел без остановок за 1,5 ч, то средняя скорость поезда («техническая скорость») больше бы соответствовала физическому понятию о средней скорости. Кто из вас объяснит мне, в чем разница понятий: средняя скорость поезда на участке Москва — Александров 70 км/ч и средняя скорость молекул кислорода при 0°C 460 м/с?



Игорь. По-моему, разница только в числах.

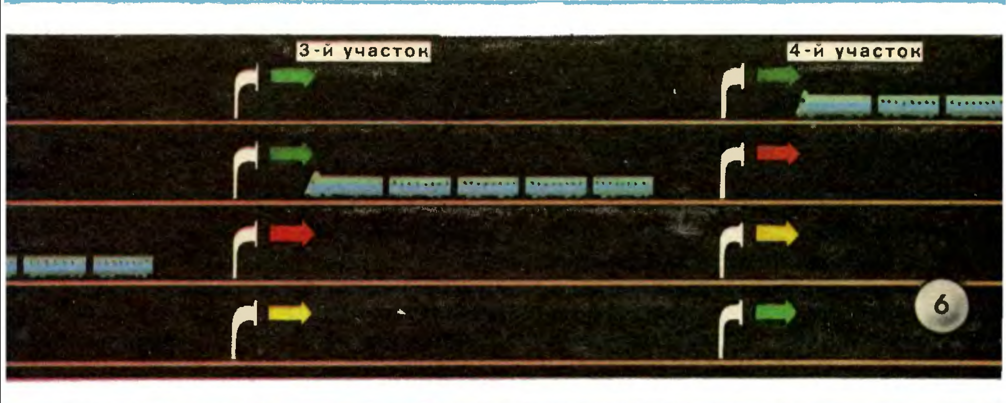
Володя. Неверно! Средняя скорость поезда — это не действительная скорость поезда, а такая постоянная скорость, с которой он будто бы шел каждую минуту, каждую секунду и прошел бы тот же путь за то же время, что и при переменном движении. На самом же деле скорость поезда на участке все время менялась в зависимости от профиля пути.

Игорь. А средняя скорость молекул?

Володя. Ну, тут речь идет не об одной молекуле. Здесь вычисляется среднее из скоростей множества молекул. Не все молекулы данного газа имеют скорость 460 м/с при 0°C: одни молекулы движутся быстрее, другие — медленнее; 460 м/с —

это такая же средняя величина, как средняя продолжительность жизни населения страны, средняя зарплата и т. п. Так ведь, папа?

— Верно, Володя. В механике под средней скоростью переменного движения действительно понимают скорость такого воображаемого равномерного движения, при котором тело прошло бы тот же путь и за такое же время, как и при данном переменном движении. Чтобы найти эту скорость, надо попросту разделить значение пройденного пути на время, за которое этот путь был пройден.



Что же касается средней скорости молекулы газа, то здесь обычно поступают иначе. Пусть для некоторого произвольно выбранного момента времени известны значения мгновенной скорости у большого числа молекул. Надо сложить все эти значения и полученную сумму разделить на число рассматриваемых молекул.

Впрочем, следует иметь в виду, что средняя скорость молекулы газа может быть определена так же, как средняя скорость в механике. Предположим, что мы в состоянии следить за какой-то конкретной молекулой и можем найти путь, который прошла эта молекула (испытав много столкновений) за некоторый промежуток времени. Разделив этот путь на рассматриваемый промежуток времени, мы получим среднюю скорость молекулы.

Володя. А будут ли совпадать средние скорости, вычисленные первым и вторым способами?

— Оказывается, будут, если в первом случае учитывать достаточно большое число молекул, а во втором рассматривать достаточно большой промежуток времени. Но давайте вернемся к механике.

Вот вам маленькая задача-ловушка. Ну-ка решите в уме: поезд проходит расстояние в 240 км со скоростью 80 км/ч, обратно — со скоростью 40 км/ч. Следовательно, в среднем он движется со скоростью 60 км/ч. Второй поезд это же расстояние в оба конца проходит с постоянной скоростью 60 км/ч. Одинаковое ли время затратят оба поезда на пробег туда и обратно?

Игорь (спустя несколько минут). Первый поезд движется 3 ч в одном направлении и 6 ч — в обратном, а всего 9 ч. Второй поезд находится в пути всего 8 ч. Странно! Эта задача, кажется, не подходит под определение средней скорости движения.

— Нет, Игорь, ловушка в самом условии: нельзя считать, что первый поезд двигался со средней скоростью 60 км/ч. Подумай, какой путь прошел первый поезд в оба конца.

— Этот путь равен 480 км.

— А за сколько времени?

— За 3+6, т. е. за 9 ч.

— Значит, средняя скорость первого поезда, определяемая по формуле $v_{ср}=\frac{s}{t}$, будет равна: $v_{ср}=\frac{480\text{ км}}{9\text{ ч}}=53{,}3\,\frac{\text{км}}{\text{ч}}$, а не 60 км/ч. Второй поезд, двигавшийся с постоянной скоростью 60 км/ч, прошел этот же путь быстрее.

— Что-то мы долго стоим. Пожалуй, успеем повторить всю физику переменного движения, пока путь откроется.

— Вот ты, Игорь, спрашивал: «Как, сидя в вагоне, определить скорость поезда?» Среднюю скорость (я разумею среднюю скорость на каком-нибудь участке) ты мог бы определить приблизительно по счету телеграфных столбов, мимо которых проносится поезд, скажем, за 10 мин. Но лучше считать не телеграфные столбы, расстояние между которыми не всегда одинаково, а километровые столбы. Если бы у тебя был секундомер, ты мог бы измерить время прохождения участка пути длиной 1 км. Формула для определения средней скорости поезда в метрах в секунду была бы такая: $v_{ср}=\frac{1000(n-1)}{t}$, где n — число столбов, а $(n-1)$ — число километровых промежутков, пройденных за время t.

Володя. Мы все время говорим о средней скорости. А как определить, что такое мгновенная скорость?

Игорь. Это действительная скорость. Это та скорость, которую имеет тело в данный момент времени в данной точке пути.

Володя. Мне кажется, папа, что такое «определение» ничего не определяет.

— Ты прав. Чтобы дать определение мгновенной скорости, надо исходить из понятия средней скорости. Пусть мы хотим найти скорость тела в некоторый момент времени t. Рассмотрим промежуток времени длительностью Δt_1: от момента t до момента $t+\Delta t_1$. Пусть за этот промежуток времени тело прошло путь Δs_1. Обозначим через $v_{ср_1}$ среднюю скорость тела за данный промежуток времени:

$$v_{ср_1}=\frac{\Delta s_1}{\Delta t_1}.$$

Затем рассмотрим более короткий промежуток времени — от момента t до момента $t+\Delta t_2$ (Δt_2 меньше, чем Δt_1). Пусть за этот промежуток пройден путь Δs_2. Запишем среднюю скорость:

$$v_{ср_2}=\frac{\Delta s_2}{\Delta t_2}.$$

Будем далее рассматривать все более короткие промежутки времени, отсчитывая их всякий раз от момента t. Измеряя пути, пройденные за эти промежутки, найдем соответствующие средние скорости. В результате мы получим последовательность средних скоростей:

$$v_{ср_1},\ v_{ср_2},\ v_{ср_3},\ \ldots,$$

вычисленных за промежутки времени от t до $t+\Delta t$ при условии, что Δt постепенно уменьшается, стремясь в пределе к нулю. Предел такой последовательности средних скоростей и есть мгновенная скорость — скорость тела в момент t.

Володя. Получается, что, чем меньше отрезок пути, тем в большей степени вычисленная средняя скорость будет приближаться к истинной, т. е. мгновенной скорости.

— Совершенно верно.

Игорь. Ну, вот и свисток, путь свободен. Поехали!

КАК ИЗМЕРЯЮТ СКОРОСТЬ

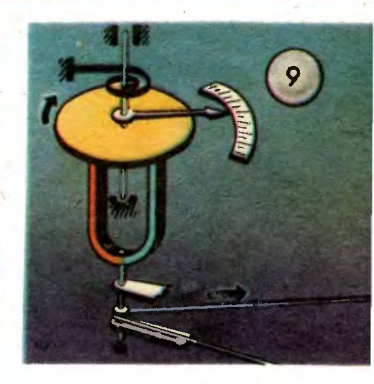
СКОРОСТЬ АВТОМОБИЛЯ

Петя еще в I классе говорил, что когда вырастет большой, то станет шофером. И вот его мечта сбылась. Сегодня Петя и девять его товарищей получили права водителя.

С каким достоинством сел он за руль! Правила уличного движения? Он знает их как свои пять пальцев! Дорожные знаки тоже знает. Вот в квадрате на синем поле буква *P* — место стоян-





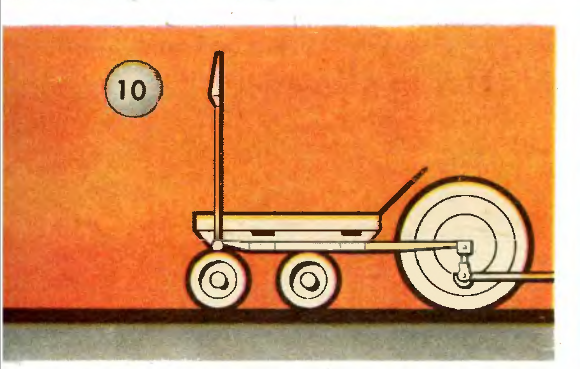


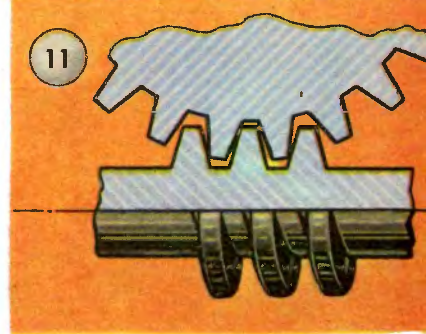
ки транспорта (рис. 7). А вот в треугольнике изображены бегущие фигурки (рис. 8); это значит, что впереди школа, надо быть предельно осторожным. Ведь дети могут неожиданно выбежать на проезжую часть. За 50 м до этого знака и 50 м после знака скорость не должна превышать 20 км/ч, чтобы можно было вовремя затормозить и остановить машину.

Иногда прямо указывают, какая максимальная скорость допустима на данном участке дороги. Например, если в белом круге с красным краем изображено крупными цифрами число 40 (см. рис. 8), то это означает, что скорость должна быть не больше 40 км/ч. Тот же круг, перечеркнутый полосой, указывает, что данное ограничение скорости снимается — далее можно ехать быстрее.

А как же узнает водитель скорость машины? Для этой цели перед ним щиток, на котором расположен измеритель скорости — спидометр.

Работа спидометра основана на возбуждении индукционных токов в алюминиевом диске при вращении магнита, находящегося под диском. Взаимодействие этих токов с магнитным полем приводит к повороту диска. Повороту препятствует спиральная пружина, возвращающая его в начальное положение. Угол поворота диска тем больше, чем больше сила тока, т. е. чем быстрее вращается магнит. На рисунке 9 изображен один из подобных спидометров. Магнит приводится во вращение от гибкого вала, соединенного с валом автомобиля. На шкале спидометра отмечены значения скорости машины в километрах в час. Спидометр показывает скорость, близкую к мгновенной. Некоторое расхождение с истинной скоростью вызывается инерцией диска (свойственной всякому измерительному прибору) — прибор не успевает мгновенно реагировать на изменение скорости.





СКОРОСТЬ ЛОКОМОТИВА

Скорость тепловоза и электровоза определяется специальным прибором — скоростемером. Самопишущий скоростемер, устанавливаемый на современных мощных пассажирских локомотивах,— это универсальный прибор. По его циферблату определяют скорость локомотива, близкую к скорости в данный момент (в километрах в час), а по графику, автоматически записанному на специальной ленте,— скорость на протяжении всего рейса. Кроме того, в циферблат скоростемера вмонтированы часы со шкалой, разделенной на 24 части, и указатель километров, прой-

денных локомотивом за данный рейс. Привод к скоростемеру осуществляется от сцепного колеса локомотива (рис. 10). Движение колеса передается скоростемеру при помощи пальца, ввернутого в ступицу колеса. При вращении колеса палец приводит во вращение червячный редуктор, т. е. механизм, благодаря которому число оборотов приводного вала скоростемера оказывается меньше числа оборотов колеса локомотива. Этот редуктор представляет собой соединение червячного винта и зубчатого колеса (рис. 11).

СКОРОСТЬ СУДНА В МОРЕ

Нельзя без волнения слушать известную песню наших славных полярников «Раскинулась даль голубая...»:

Ночью и днем
В просторе морском
Стальные плывут корабли...

Как находят они свой путь, как определяет штурман курс корабля вдали от берегов, когда, куда ни обернешься, только небо да вода? Как измеряют скорость судна?

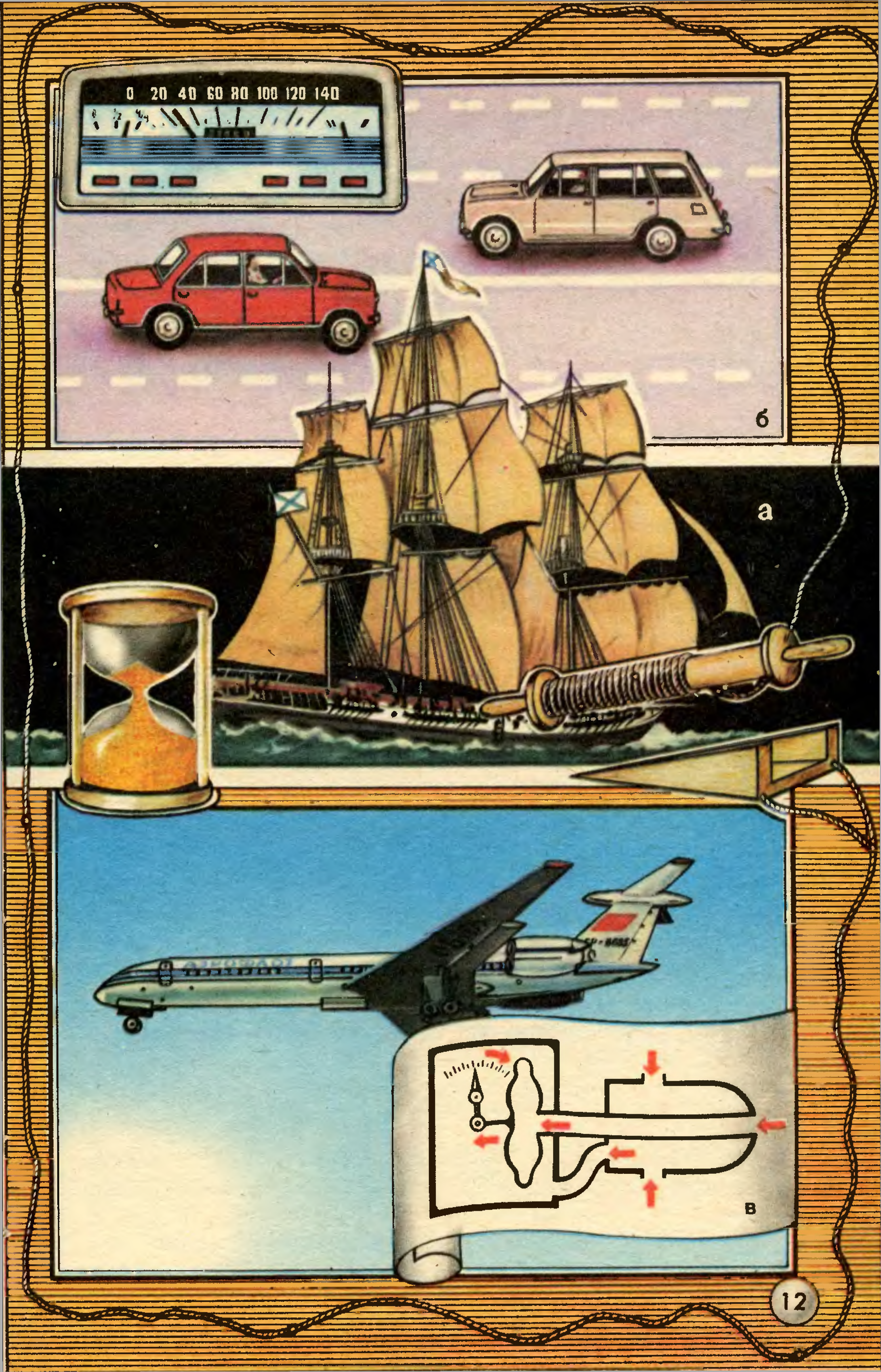
В морской практике сохранилась старинная мера скорости — узел. Что это за мера?

Название «узел» связано со старинным способом измерения скорости корабля при помощи лага (рис. 12, *а*). Тросик, или так называемый лаглинь, с привязанной на конце доской бросают с кормы корабля. Доска покоится в воде позади уходящего от нее корабля, а тросик сматывают с катушки, которую матрос держит в руках. На тросике завязаны узлы, отстоящие друг от друга на определенном расстоянии. Сосчитав число узлов за определенное время, можно определить скорость корабля в «узлах». В настоящее время применяют механические и электрические лоты, но скорость продолжают измерять в узлах.

Узел — самостоятельная единица скорости. Сказать: «Судно идет со скоростью 36 узлов в час» — неправильно. Очень хорошо описана нелепость такого выражения в рассказе «Летучий голландец», отрывок из которого приводится ниже.

«— Скажите, капитан, а какая у нас скорость? — подняв очки от записной книжки, вновь спросил гость.

Гужевой открыл уже рот, чтобы ответить своей обычной


0 20 40 60 80 100 120 140
б
а
в
12

остротой, что было шесть узлов в час — в первый, а во втором и трех не натянули, но Пийчик его предупредил:

— Сколько положено: полный ход, двенадцать узлов»[1].

Тросик лага, выпускаемый на ходу с кормы, разбивался узелками на расстоянии по $\frac{1}{120}$ мили (50 футов). Сосчитав число узелков, пробежавших за полминуты ($\frac{1}{120}$ ч), можно узнать скорость в морских милях в час. Отсюда следует, что выражение «30 узлов в час» явно бессмысленно: получится, что корабль вместо приличного хода в 55 км/ч тащится по 1500 футов (470 м) в час, что и неверно, и обидно.

СКОРОСТЬ САМОЛЕТА

Вы летали на Ту-154? От Москвы до Сухуми он долетает за 2 ч. Средняя скорость этого чудесного советского самолета около 1000 км/ч. Можно ли измерить такую скорость?

Скорость движения автомобиля и локомотива определяют по скорости вращения колес (окружная, или линейная, скорость точки на ободе колеса есть в то же время скорость поступательного движения машины); скорость движения судна определяют по удалению от доски, выброшенной в море. Но как определить скорость летящего над Землей самолета? Приходится признать, что пока нет совершенных способов измерения скорости самолета относительно Земли. Обычно ограничиваются определением только «воздушной скорости», т. е. скорости относительно той среды, в которой перемещается самолет. Для ее определения используется зависимость между скоростью движения самолета и давлением со стороны встречного потока воздуха. Такое давление слагается из статического давления, зависящего от плотности воздуха, и динамического давления, которое зависит от скорости полета и от плотности воздуха. Сумма этих давлений называется полным давлением:

$$p_{\text{полн}} = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}.$$

Указатель скорости на самолете состоит из двух основных частей: приемника воздушного давления и чувствительного

---

[1] Соболев Л. Морская душа.— М.: Гослитиздат, 1962, с. 159—160.

дифференциального манометра (рис. 12, *в*). Приемник воздушного давления имеет трубку, воспринимающую полное давление; эта трубка находится внутри цилиндрического корпуса с боковыми отверстиями, позволяющими регистрировать статическое давление. Разность полного и статического давлений представит динамическое давление и может быть измерена дифференциальным манометром, показывающим разность давлений внутри и снаружи гофрированных коробок. Шкала манометра градуируется не в единицах давления, а в единицах скорости на основе зависимости, выражаемой формулой для динамического давления:

$$p_{\text{дин}} = \rho \frac{v^2}{2}.$$

Здесь ρ — плотность воздуха за бортом самолета, v — «воздушная скорость» самолета.

Рассмотренные примеры показывают, насколько разнообразны применяемые на практике способы измерения скорости транспортных средств. Важно подчеркнуть, что с развитием техники эти способы совершенствуются (параллельно с совершенствованием самих транспортных средств). От старинного ручного лага и песочных часов, применявшихся на старинных судах, перешли к электрифицированным лагам-хронометрам, применяющимся на современных океанских лайнерах. На автомобилях устанавливают магнитоэлектрические спидометры (рис. 12, *б*; см. также рис. 9), на современных локомотивах — самопишущие скоростемеры.

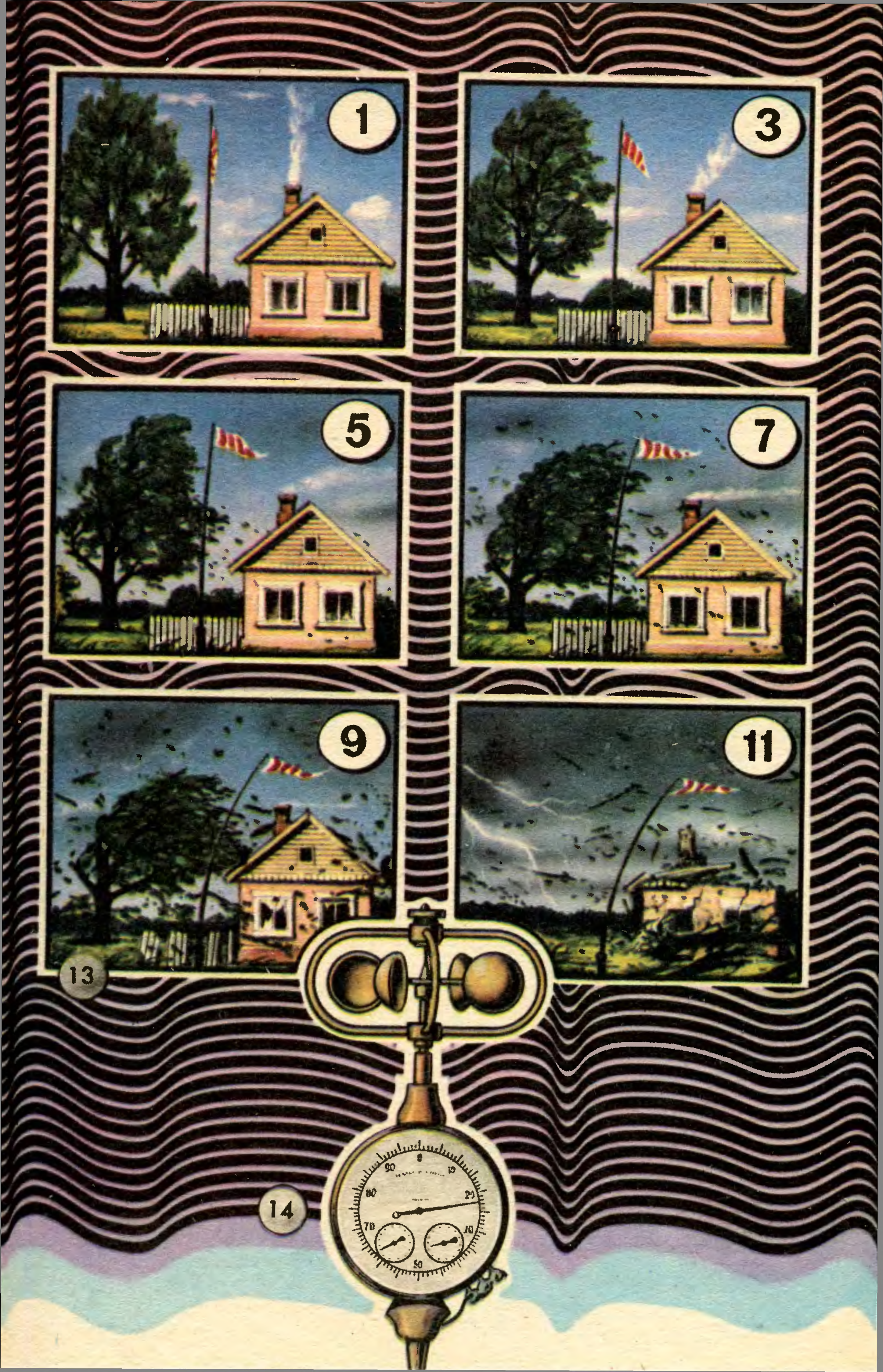
СКОРОСТЬ ВЕТРА

На метеорологических станциях скорость ветра обычно измеряют при помощи флюгера с ветромерной доской. Когда ветра нет, доска висит вертикально. Чем сильнее ветер, тем на больший угол отклоняется доска.

По штифтам расположенного около доски указателя можно определить скорость ветра.

Ниже приводится таблица сравнительной оценки силы ветра (в баллах), соответствующей определенной скорости (в метрах в секунду и в километрах в час).

Рисунок 13 иллюстрирует действие ветра разной силы (а баллах).


1
3
5
7
9
11
13
14

Сила ветра, баллы	Признаки для оценки	Скорость ветра,	
		м/с	км/ч
0	Листья на деревьях не шевелятся, дым из труб поднимается вертикально . . .	0	0
1	Дым немного отклоняется, но ветер не ощущается	0,3—1,5	1—5
2	Ветер ощущается лицом, листья на деревьях шелестят	1,6—3,3	6—11
3	Листья и тонкие ветки деревьев колышутся	3,4—5,4	12—19
4	Качаются тонкие ветки, поднимается пыль	5,5—7,9	20—28
5	Качаются тонкие стволы деревьев, ветер чувствуется рукой	8—10,7	29—38
6	Качаются стволы деревьев средней толщины	8—13,8	39—49
7	Качаются большие деревья, идти против ветра трудно	13,9—17,1	50—61
8	Ветер ломает ветви и сучья	17,2—20,7	62—74
9	Ветер сносит легкие постройки, валит заборы	20,8—24,4	75—88
10	Деревья вырываются с корнем, сносятся прочные постройки	24,5—28,4	89—102
11	Ветер производит большие разрушения, валит телеграфные столбы, вагоны и т. п.	28,5—32,6	103—117
12	Ураган разрушает дома, опрокидывает каменные стены	32,7 и более	118 и более

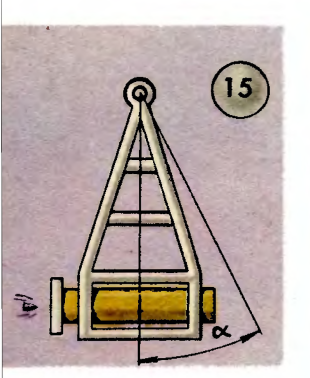
Более точно среднюю скорость ветра можно определять при помощи анемометра (рис. 14). Прибор состоит из вращающейся крыльчатки, ось которой при вращении приводит в действие зубчатый механизм, подсчитывающий число оборотов крыльчатки за определенное время. Зная число оборотов крыльчатки, можно рассчитать скорость ветра. При помощи анемометра можно изучать распределение ветров по высоте.

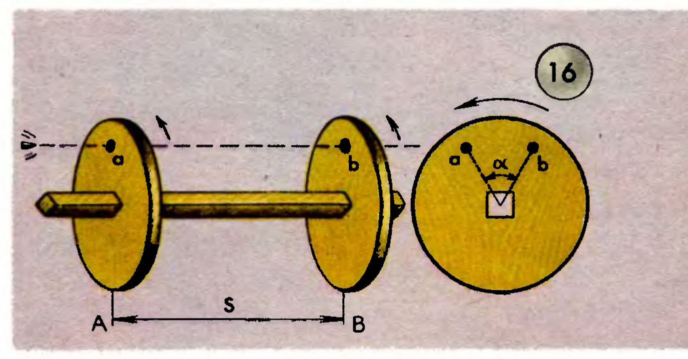
Полученные на метеорологической станции результаты наблюдения за ветром имеют большое научное значение прежде всего для самой метеорологии — науки о погоде и климате, а также для авиации, артиллерии и даже для космических полетов.

СКОРОСТЬ ПУЛИ

Для определения скорости пули можно применить примерно такой же способ, как и при определении скорости ветра. Только отклоняться будет не ветромерная доска, а баллистический маятник — ящик с песком или землей, подвешенный на прочной раме так, что может качаться в вертикальной плоскости (рис. 15).

Скорость рассчитывается в зависимости от угла отклонения α в результате попадания пули в ящик.





Однако мы рассмотрим более простой способ, рекомендуемый для лабораторного определения скорости пули. На общую ось надевают два фанерных или картонных диска такого размера, чтобы при стрельбе вдоль оси пуля могла пробить оба диска (рис. 16). Пусть расстояние между дисками есть s; оно может составлять, например, 0,3 м. Число оборотов дисков в минуту n определяется с помощью специального счетчика оборотов, или тахометра. Пуля пробивает оба диска; при этом отверстие на одном диске (отверстие a на рисунке) оказывается смещенным по отношению к отверстию на другом диске (по отношению к отверстию b) на некоторый угол α. Дело в том, что пока пуля, пробив диск A, пролетает расстояние s до диска B, последний успевает повернуться на угол α. Время t, за которое происходит указанный поворот, можно найти, разделив $\alpha/360$ на n (здесь α измерено в градусах, поэтому $\alpha/360$ есть доля поворота, приходящаяся на промежуток времени t).

Таким образом,

$$t = \frac{\alpha}{360\ n}.$$

Поскольку, как уже отмечалось, n есть число оборотов в минуту, то t в данной формуле выражается также в минутах. Обычно, однако, время измеряют в секундах; в связи с этим умножим $\alpha/360\ n$ на 60. Итак, время t в секундах равно:

$$t = \frac{\alpha}{60\ n}.$$

Отсюда следует, что скорость пули v, измеряемая в метрах в секунду, может быть определена по формуле

$$v = \frac{s \cdot 60\ n}{\alpha}.$$

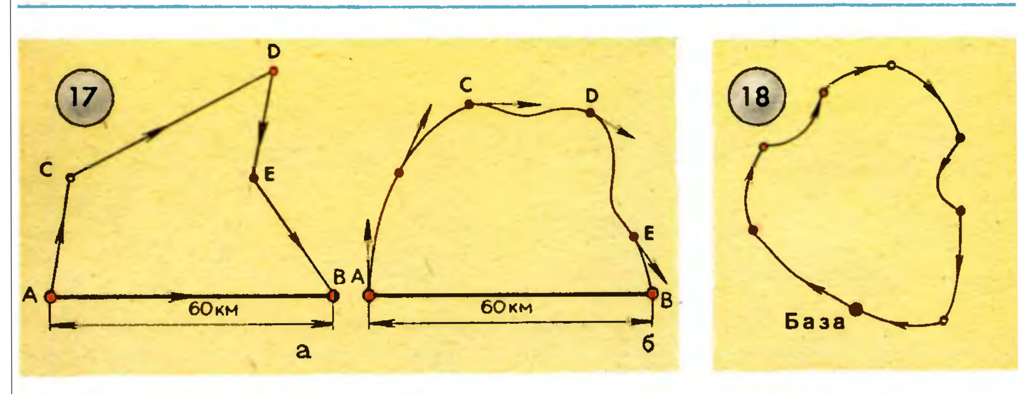
Здесь, напоминаем, s измеряется в метрах, n — в количестве оборотов за минуту, α — в градусах.

НЕОБХОДИМОЕ ДОПОЛНЕНИЕ О СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ

В двух предыдущих беседах вы несколько раз встречали выражение «средняя скорость». Считаю необходимым дать разъяснение этому понятию, так как оно не всегда правильно освещается в книгах по физике. Так, некоторые авторы утверждают, что средняя скорость (как и всякая скорость) есть величина векторная и имеет направление от начальной точки к конечной точке перемещения. Другие же, наоборот, рассматривают среднюю скорость как отношение пройденного пути ко времени и потому считают среднюю скорость скаляром.

Какое же утверждение верно: средняя скорость — скаляр или вектор? Ответ зависит от определения средней скорости. Если ее определять как скорость перемещения, т. е. как отношение перемещения ко времени, за которое это перемещение произошло, средняя скорость будет вектором. Ведь перемещение есть вектор. Если же средняя скорость определяется как отношение пройденного пути (длины траектории) ко времени, то она будет скалярной величиной.

Допустим, вы ждете к себе двух товарищей, выезжающих в одно время из одного и того же места. Первый приехал к вам через час после выезда, тогда как второй, допустим, явился через 2 ч. Вы, естественно, бросаете ему упрек: «Как медленно ты ехал!» Ваше возмущение понятно: ведь расстояние до вас от места отправления обоих товарищей одно и то же, например 60 км. Простой расчет показывает, что средняя скорость первого была 60 км/ч, второго 30 км/ч. Транспортные средства (автомобиль) одни и те же. В чем же дело? Оправдание: «Да я же заезжал в *C*, в *D* и в *E*».



Скорости 60 и 30 км/ч — скорости перемещения, величины векторные, направленные от *A* к *B* (рис. 17, *а*). Но второй товарищ не согласен с таким определением его скорости. Спидометр на его машине показывал то же, что и на машине первого (60 км/ч). Что же измерял спидометр? Он измерял скорость движения по траектории *ACDEB*. Скорость могла в отдельные моменты меняться. Это мгновенная скорость, величина векторная, направленная по касательной к траектории (рис. 17, *б*). После пробега некоторого участка или всего маршрутного пути можно найти среднюю скорость на участке, взяв отношение длины пути (не перемещения) ко времени. Это уже средняя скорость движения по траектории, величина скалярная.

Рассмотрим еще пример. Шофер, выехавший с базы (рис. 18) по путевке с объездом различных пунктов, вернулся снова на базу через 6 ч. Пусть длина пройденного машиной пути равна 120 км. Определение средней скорости как скорости перемеще-

ния в этом случае не годится. Перемещение равно нулю, машина вернулась в исходную точку. Но ведь бензин израсходован, единственное объяснение этого расхода — работа двигателя машины на пути 120 км при скорости $\frac{120\ \text{км}}{6\ \text{ч}}=20\frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Эта средняя скорость — скаляр.

Итак, различайте среднюю скорость перемещения (величина векторная) и среднюю скорость движения на участке траектории (скаляр).

А если вы захотите немного отвлечься от физики, прочтите книгу Жюля Верна «Путешествие вокруг света в 80 дней» и проведите диспут с товарищами, о какой скорости там говорится на различных участках, которые проехал Филеас Фогт на поезде, на пароходе, на слоне, на парусной лодке и в целом на всем пути. Возникнет много вопросов, и спор принесет пользу его участникам.

ЧЕТЫРЕ ЗАТРУДНИТЕЛЬНЫХ ПОЛОЖЕНИЯ

Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый,
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

(А. С. Пушкин.)

«Забавный случай» этот, если верить легенде, произошел в небольшом древнегреческом городке Элее (на юге Италии). Лет за 500 до нашей эры жил здесь знаменитый философ Зенон. К Зенону из разных мест стекались юноши и взрослые мужи приобщиться его мудрости. «Я (Сократ) могу тебе назвать Пафодора, сына Иссолоха, и Каллия, сына Каллиана, которые оба стали мудрыми и славными благодаря общению с Зеноном, за что заплатили ему по сто мин каждый».

Странным показалось бы учение Зенона в наши дни. Он отрицал возможность познания мира посредством наших чувств: «верить можно только разуму». Мир, по его учению, неизменен

и неподвижен. Несмотря на свидетельства наших чувств, утверждал он, нельзя разумом доказать существование движения в мире. Излюбленным приемом доказательства своих слов Зенон избрал доказательство от противного, приведение к абсурду (нелепости). Первая из его знаменитых апорий[1] именно и имела целью доказать невозможность движения. «Движенья нет...», оно даже не может начаться. Чтобы пройти расстояние AB (рис. 19, *а*), надо сначала пройти половину его, AB_1, а еще раньше надо пройти одну четвертую часть, AB_2, и т. д. Продолжая делить пополам все уменьшающиеся отрезки, мы никогда не кончим деления и, следовательно, никогда не начнем движения.

Возмущенный такими словами, другой мудрец встал и вышел из помещения; практика — вернейшая проверка теории.

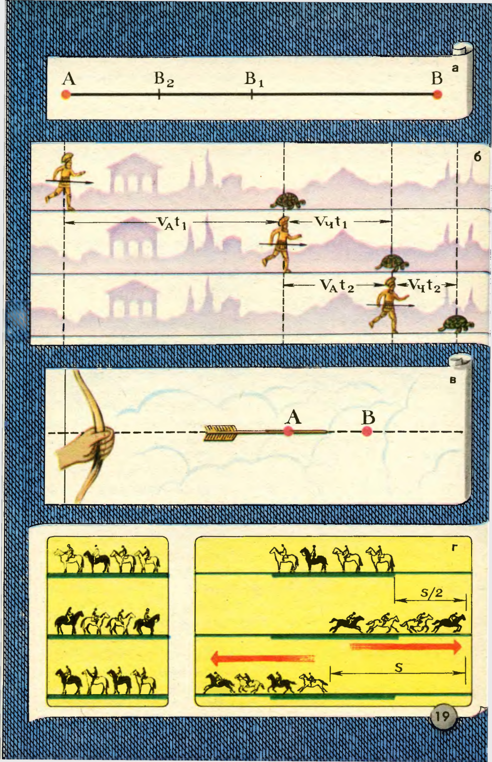
Ошибка Зенона ясна: из возможности бесконечного деления отрезка он неправомерно делал вывод о бесконечности времени, требуемого для прохождения отрезка.

Вторая апория Зенона — «Ахиллес и черепаха» — представляет собой почти повторение первой, но выражена в столь оригинальной форме, что если вы предложите эту задачу вашим товарищам в классе, то наверняка возникнут горячие споры. Вот эта задача: быстроногий Ахиллес (герой троянской войны) никогда не догонит черепаху, хотя последняя, как известно, считается образцом медленности движения. Пока Ахиллес проходит расстояние, разделявшее их первоначально, черепаха не ждет, а продолжает ползти, и Ахиллесу надо пройти первоначальное расстояние плюс образовавшееся новое расстояние (рис. 19, *б*). Но когда Ахиллес пройдет и новое расстояние, черепаха, продолжая ползти, опять уйдет от Ахиллеса, и последнему опять надо будет догонять черепаху, и так можно продолжать рассуждение бесконечно долго. Получается, что Ахиллесу никогда не настичь черепахи.

Но ведь это неправда! Вы легко опровергнете этот парадокс, если знаете формулу равномерного движения и умеете решать уравнение с одним неизвестным. Конечно, Ахиллес догонит черепаху. Пусть это произойдет через какое-то время t. За это время он пройдет расстояние, измеряемое произведением $v_A t$, где v_A — скорость Ахиллеса. Черепаха за то же время проползет рас-

---

[1] Апория в переводе с греческого означает «безвыходное положение, тупик, непреодолимая трудность».


а
A
B2
B1
B
б
VAt1
VЧt1
VAt2
VЧt2
в
A
B
г
S/2
S

стояние, измеряемое произведением $v_ч t$, где $v_ч$ — скорость черепахи. Если первоначальное расстояние, отделявшее Ахиллеса от черепахи, обозначить d, то можно написать:

$$v_А t = v_ч t + d.$$

Отсюда находим:

$$t = \frac{d}{v_А - v_ч}.$$

Можно решить эту задачу иначе. Скорость Ахиллеса $v_А$ больше скорости черепахи $v_ч$, поэтому расстояние между ними сокращается за единицу времени на $v_А - v_ч$. Все расстояние между Ахиллесом и черепахой обозначим d, оно будет пройдено за время $t = \frac{d}{v_А - v_ч}$. За это время Ахиллес и догонит черепаху.

Третья апория — «Стрела». Она интересна тем, что раскрывает важнейшее свойство движения — его относительность. Но сначала послушаем Зенона. Выпущенная из лука стрела (рис. 19, *в*) в какой-то момент времени находится в точке *A*. В это мгновение она покоится. Когда стрела достигнет точки *B*, то можно будет утверждать, что она покоится в этот момент в этой точке *B*. В какой бы точке мы ее ни застали, она покоится в тот момент, в который находится в этой точке, т. е. покоится в любой момент, покоится вообще.

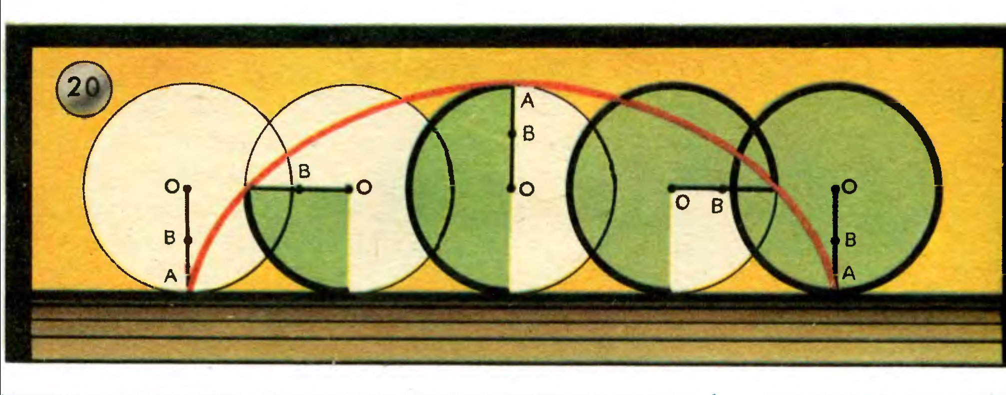
В чем же тут дело? Зенон, очевидно, смешивал точку на стреле с точкой вне стрелы. Да, конечно, стрела неподвижна относительно точки *A*, взятой на самой стреле, как неподвижны друг относительно друга предметы в вагоне движущегося поезда.

Обитатели Земли охотно считают Землю неподвижной; она действительно неподвижна относительно находящихся на ней предметов. Но Земля мчится вокруг Солнца, одновременно вращаясь вокруг своей оси. Об этом и думал «упрямый Галилей», когда, согласно преданию, после своего отречения от «ереси вращения Земли» воскликнул: «А все-таки она движется».

Вот четвертая из известных апорий Зенона против движения, называемая «Стадион», по-гречески — «ристалище, бега» (рис. 19, *г*). Представьте себе три параллельных ряда всадников, готовых к старту. Сигнал! Второй ряд мчится направо, третий — с той же скоростью налево, а первый ряд остается на месте. К не-

которому моменту времени всадник второго ряда промчался на половину неподвижного ряда, т. е. на $\frac{s}{2}$. Но за то же время он ускакал от замыкающего всадника третьего ряда на целый ряд, т. е. на s. Так как за одинаковые промежутки времени всадник должен проскакать одинаковые расстояния, то $\frac{s}{2}=s$. Поскольку это нелепо, то получается, что движение само себя отрицает.

Наивно? Да, наивно. Теперь каждый школьник, немного знакомый с физикой, скажет, что если скорость всадника второго

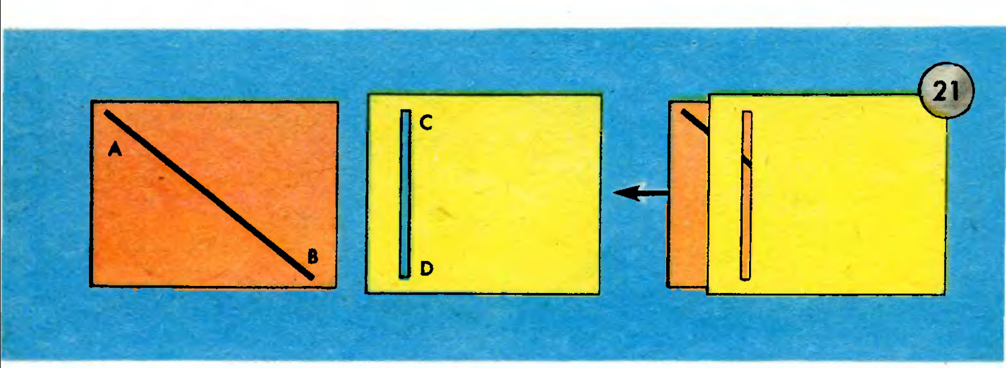


ряда относительно первого, неподвижного ряда равна v, то относительно третьего ряда, движущегося в том же аллюре, она равна $2v$ и перемещение относительно движущегося ряда вдвое больше, чем относительно неподвижного. Не будем, однако, очень строги к Зенону. Во-первых, это было почти две с половиной тысячи лет назад, а во-вторых, мы должны оценить заслугу Зенона, который одним из первых указал на противоречивость движения. Однако, не сумев объяснить эту противоречивость, он пришел к «опровержению» движения.

В жизни нам не раз приходится сталкиваться с относительным характером движения и становиться жертвой не всегда легко разрешимых иллюзий (обмана чувств). Не приходилось ли вам из окна движущегося поезда наблюдать движение другого поезда, идущего по параллельному пути? В какое-то время этот поезд обгоняет ваш. Но вот машинист, словно угадав ваше желание, прибавляет ход, и вы торжествуете: скорость вашего «соперника»

становится все меньше и меньше, вот уже оба поезда кажутся неподвижными относительно друг друга, и, наконец, «ура», обогнали! Вагоны соседнего поезда «уплывают» назад! Вся эта сценка — результат относительности скоростей.

Насколько различными оказываются движения тела, если их рассматривать относительно различных, как говорят, тел отсчета, убедительно покажет вам пример колеса, катящегося по ровной поверхности (рис. 20). Как вы думаете, какова траектория какой-нибудь точки катящегося колеса, например точки A? Вопрос не имеет смысла, скажете вы, если не указать систему от-



счета. Относительно поверхности земли траектория точки A — циклоида. Отметим попутно, что по этой кривой вычерчивают профиль некоторых зубчатых колес, когда хотят добиться плавного качения зуба по зубу в передаче. Относительно движущегося экипажа точка A описывает окружность.

Приведем еще один пример.

Каждый из вас наблюдал наклонные струйки дождя на оконном стекле движущегося вагона. А для «неподвижного» наблюдателя, стоящего на платформе, капли дождя в безветренную погоду падают вертикально.

Вы можете сделать простой прибор, хорошо поясняющий это наблюдение. Вырежьте два прямоугольника из плотной бумаги. На одном проведите жирную наклонную черту AB (рис. 21), изображающую след капли на стекле движущегося вагона. На другом листке сделайте вертикальный прорез CD. Наложите второй листок на первый. Тяните теперь нижний листок из-под верх-

него в направлении движения вагона. Вы увидите в прорез перемещающуюся черную точку (каплю).

Так и для наблюдателя, стоящего неподвижно вне вагона, капля движется вертикально вниз, а для наблюдателя, движущегося вместе с вагоном, капля движется по наклонной линии *AB*.

БЕСЕДА В ВЕНЕЦИАНСКОМ АРСЕНАЛЕ

УРОК ФИЗИКИ В VIII КЛАССЕ

Сегодня я расскажу вам кратко о развитии механики.

История не сохранила нам имени того первобытного «инженера-конструктора», которому первому пришла в голову мысль взять в руки палку, чтобы отвалить тяжелый камень и поймать юркнувшую под него ящерицу. Да и было ли еще имя у этого «инженера»? Я умышленно употребил это звание, потому что слово «инженер» происходит от французского слова «гений», а первая мысль об использовании палки в качестве орудия, увеличивающего силу руки, поистине была гениальной мыслью.

Постепенно, на протяжении многих веков, в практике изготовления орудий охоты, постройки жилищ, а впоследствии городов, в постройке судов, изготовлении орудий труда накапливались опыт и практические умения. Они передавались из поколения в поколение. Конечно, это еще не было наукой. В древних государствах Востока, в Египте зарождающаяся наука была достоянием жрецов, использовавших накопленные знания в корыстных целях. Жрецы были первыми астрономами, ввели летосчисление. Они умели предсказать время разлива Нила и время наступления полевых работ. Для восстановления границ земельных участков, которые ежегодно размывались, приходилось на земле вычерчивать разные фигуры, отсюда ведет свое начало геометрия («землемерие»).

В Греции в отличие от Египта развивающаяся наука не была привилегией жрецов. Греческие ученые были одновременно и философами, и математиками, и естествоиспытателями. Особенным почетом пользовалась у них геометрия. Механика как наука выделилась из геометрии. «Механика» — слово греческое, в переводе на русский язык означает «сложное, затейли-

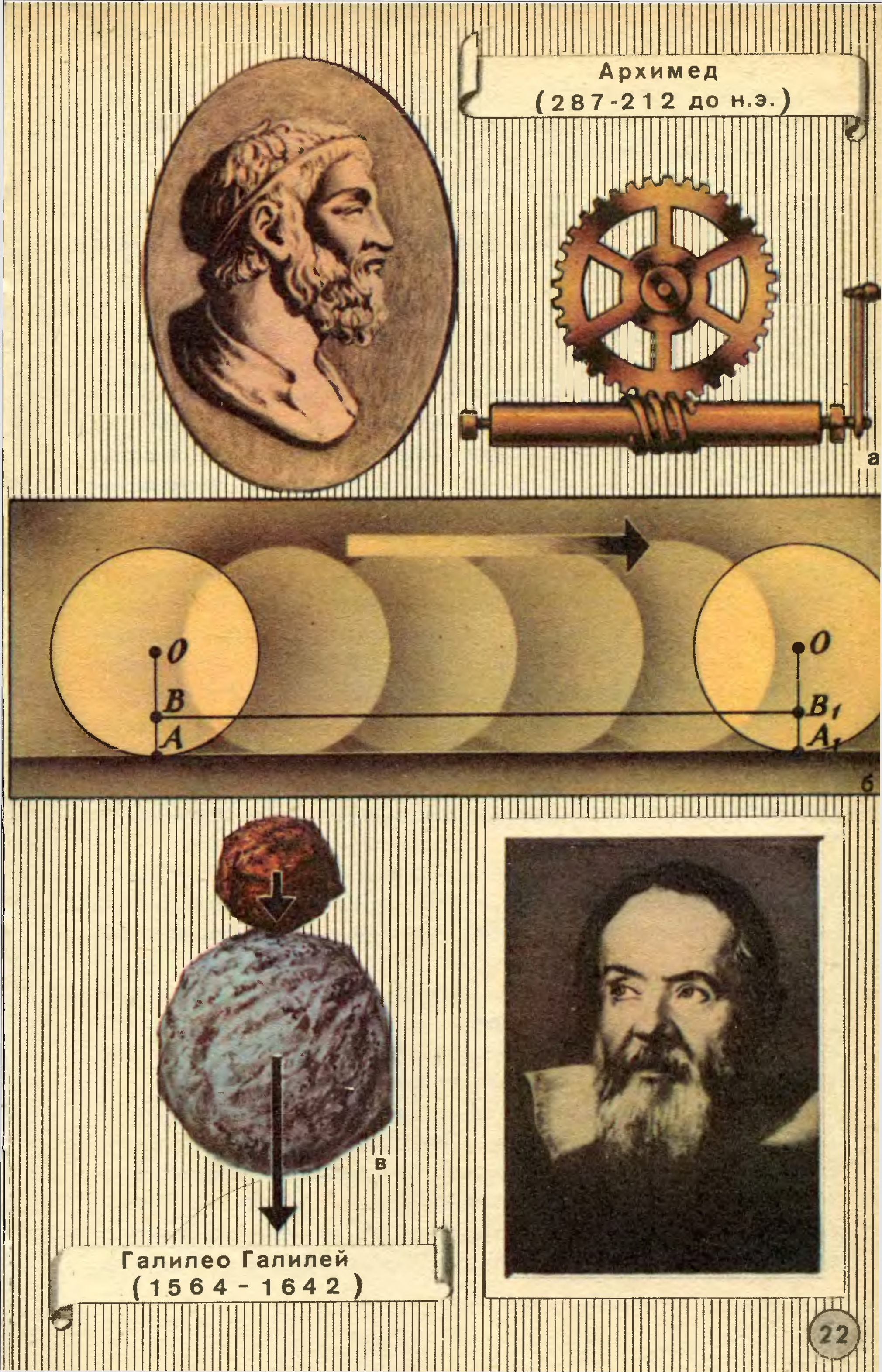
вое приспособление, хитрую штуку», впоследствии — «мастерство», относящееся к машинам. В настоящее время механика — это наука о простейшей форме движения материи — механическом движении.

В рабовладельческой Греции ремесло, труд, а вместе с ними и физический эксперимент считались делом низким, недостойным свободного гражданина. По словам греческого историка Плутарха, «механика, изгнанная из геометрии, отделилась от нее и долгое время находилась в пренебрежении, став лишь одной из практических отраслей военного искусства». Знаменитый геометр Греции Архимед известен изобретениями многих механизмов и машин: бесконечного винта (рис. 22, *а*), водоподъемной машины, полиспаста и др. Но тот же историк называет его изобретения «игрушками геометрии». А о том, как пригодились машины Архимеда при защите осажденных римлянами Сиракуз, вы узнаете, прочитав отрывок из сочинения того же Плутарха:

«В это время Архимед и привел в действие свои машины. В неприятельскую пехоту неслись пущенные им различного рода стрелы и невероятной величины камни с шумом и страшной быстротой. Решительно ничто не могло вынести силы их удара. На море внезапно поднимались со стен осажденного города бревна, загнутые наподобие рога. Одни из них ударяли в некоторые корабли сверху и силой удара топили их. Другие железными лапами или клювами, наподобие журавлиных, схватывали корабли за носы, поднимали их в вертикальном направлении на воздух, ставили на корму и затем (удалив крюк) топили».

Живший на сто лет раньше Архимеда греческий философ Аристотель механику определял так: «Под механикой разумеем мы ту часть практического искусства, которая помогает нам разрешать затруднительные вопросы». Познакомимся с одним из таких затруднительных вопросов, известных под названием «колесо Аристотеля» (рис. 22, *б*).

Представим себе колесо, катящееся по прямой линии. Пусть колесо сделает полный оборот. Тогда точка A соприкосновения колеса с прямой коснется прямой в точке A_1 и расстояние $|AA_1|$ будет равно длине окружности колеса. В то же время какая-нибудь другая точка колеса, например точка B, тоже совершит полный оборот, и может показаться, что расстояние $|BB_1|$ равно длине описанной ею окружности. Получается нелепый вывод, что длины окружностей разных радиусов равны между собой. Как согла-


Архимед
(287-212 до н.э.)
а
O
B
A
O
B_1
A_1
б
в
Галилео Галилей
(1564 - 1642)

совать эти развертывания окружностей и перемещения точек? Предлагаем вам, читатель, самостоятельно найти выход из создавшегося затруднения.

Минуя более чем тысячелетний период средних веков, перенесемся мысленно в Италию, в местечко Арчетри, близ Флоренции, где с 1633 года под надзором инквизиции доживал свои дни Галилео Галилей.

Под страхом отлучения от церкви он вынужден был отречься от учения Коперника о движении Земли. Однако Галилей навсегда остался верным новому мировоззрению. К этому времени он приобрел широкую известность своими открытиями в области механики и астрономии. С помощью сконструированного им телескопа с достаточно большим увеличением он открыл горы на Луне, пятна на Солнце, спутников Юпитера и фазы Венеры. Велика роль Галилея и в развитии механики. Он вполне осознал и применил к решению практических задач закон инерции, хотя и не выразил его с такой четкостью, с какой это сделал позднее Ньютон. Он изучал движение тел под действием силы тяжести: падающих и скатывающихся с наклонной плоскости, качания маятника. В своих выводах он резко разошелся с господствовавшим в то время учением схоластов, придерживавшихся ложного учения Аристотеля. Поскольку учение Аристотеля поддерживалось всесильной тогда католической церковью, то выступление против этого учения считалось опасной ересью.

Чтобы оценить смелость учения Галилея, надо знать эпоху, в которую он жил. Это было триста с лишним лет назад. В Италии еще свежа была память о кровавых правителях Медичи, преступных папах Борджия; в Риме в 1600 году был сожжен живым Джордано Бруно. Во Франции еще не изгладилась память об ужасах варфоломеевской ночи. В Испании и других государствах Европы пылали костры инквизиции, на которых сжигали «колдунов» и «ведьм». В Германии современник и друг Галилея астроном Кеплер едва мог спасти от этой участи свою мать, обвиненную в «колдовстве».

Так вот в эту далекую мрачную пору и жил Галилео Галилей, профессор математики в Падуе, затем во Флоренции, основоположник новой науки, опирающейся не на авторитеты древних писателей, а на опыт, эксперимент. После отречения от учения Коперника, вынужденный удалиться в изгнание, больной, уже слепнущий семидесятилетний Галилей не бросает занятия на-

укой. В 1638 году в Голландии выходит из печати самое знаменитое из его произведений — «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению».

У меня в руках эта знаменитая книга Галилея (в русском переводе). Книга написана в виде бесед нескольких людей, собирающихся для этой цели в венецианском арсенале (помещении, где хранятся орудия военного назначения).

Главной темой беседы первого дня была «Новая отрасль науки, касающаяся сопротивления твердых тел разрушению».

Прочность твердого тела объясняли тогда боязнью пустоты между отделившимися частями. Галилей боролся с господствовавшим в то время учением и через одного из собеседников проводит мысль, из которой следует, что, несмотря на боязнь пустоты, вода не может быть поднята насосом на высоту, большую 18 локтей (10,33 м).

Познакомлю вас кратко еще с одной беседой, в которой говорится о свободном падении тел. Галилей в лице Сагредо и Сальвиати вступает в спор по этому вопросу с Симпличио, сторонником учения Аристотеля.

«Симпличио. ...Аристотель доказывает, что существование движения противоречит допущению пустоты. Его доказательство таково. Он рассматривает два случая: один — движение тел различного веса в одинаковой среде; другой — движение одного и того же тела в различных средах. Относительно первого случая он утверждает, что тела различного веса движутся в одной и той же среде с различными скоростями, которые относятся между собой, как веса тел, так что, например, если одно тело в десять раз тяжелее другого, то и движется оно в десять раз быстрее...

Сальвиати. ...Я сильно сомневаюсь, чтобы Аристотель видел на опыте справедливость того, что два камня, из которых один в десять раз тяжелее другого, начавшие одновременно падать с высоты, предположим, ста локтей, двигались со столь различной скоростью, что, в то время как более тяжелый достиг бы земли, более легкий прошел бы всего десять локтей.

Симпличио. Из ваших слов выходит, что вы производили подобные опыты.

Сагредо. Но я, синьор Симпличио, не производивший никаких опытов, уверяю вас, что пушечное ядро весом в сто, двести

и более фунтов не опередит и на одну пядь мушкетную пулю весом меньше полфунта при падении на землю с высоты двухсот локтей.

Сальвиати. И без опытов, путем краткого, но убедительного рассуждения мы можем ясно показать неправильность утверждения, будто тела более тяжелые движутся быстрее, нежели более легкие... В самом деле, скажите мне, синьор Симпличио, признаете ли вы, что каждому падающему твердому телу присуща от природы определенная скорость, увеличить или уменьшить которую возможно только введением новой силы или препятствия?

Симпличио. Я не сомневаюсь в том...

Сальвиати. Таким образом, если мы имеем два падающих тела, естественные скорости которых различны, и соединим движущееся быстрее с движущимся медленнее, как это показано на рисунке[1], то ясно, что движение тела, падающего быстрее, несколько задержится, а движение другого несколько ускорится. Вы не возражаете против такого положения?

Симпличио. Думаю, что это вполне правильно.

Сальвиати. Но если это так и если вместе с тем верно, что больший камень движется, скажем, со скоростью восемь «градусов»[2], тогда как другой, меньший — со скоростью в четыре «градуса», то, соединяя их вместе, мы должны получить скорость, меньшую восьми «градусов»; однако два камня, соединенные вместе, составляют тело, большее первоначального, которое имеет скорость в восемь «градусов», и, следовательно, выходит, что более тяжелое тело движется с меньшей скоростью, чем более легкое, а это противно вашему предположению.

Симпличио. Я чувствую себя совершенно сбитым с толку. Мне кажется, что малый камень, присоединенный к большему, увеличивает вес последнего; но, увеличивая вес, он должен, если не увеличить скорость, то во всяком случае не уменьшить ее.

Сальвиати. Здесь вы совершаете новую ошибку, синьор Симпличио, так как неправильно, что малый камень увеличивает вес большего.

---

[1] См. рис. 22, *в*.

[2] «Градус» — старинная единица измерения скорости; в настоящее время не применяется.

Симпличио. Ну это уже превосходит мое понимание.

Сальвиати. Нисколько, все будет понятно, как только я избавлю вас от заблуждения, в которое вы впали. Дело в том, что необходимо делать различие между телами, пребывающими в покое и находящимися в движении. Большой камень, взвешиваемый на весах, приобретает больший вес от наложения на него не только другого камня: положенная на него связка пакли увеличивает его вес на шесть — десять унций[1], которые весит сама пакля. Но если вы заставляете камень свободно падать с некоторой высоты вместе с наложенной на него паклей, то думаете ли вы, что при движении пакля будет давить на камень и тем увеличивать скорость его движения или что она его замедлит, поддерживая камень? Мы чувствуем тяжесть на плечах, когда сопротивляемся движению, к которому стремится давящая тяжесть; но если мы опускались бы с такой же скоростью, с какой перемещается свободно падающий груз, то каким образом тяжесть могла бы давить на нас? Не видите ли вы, что это подобно тому, как если бы мы хотели поразить копьем кого-либо, кто бежит впереди нас с равною или большею скоростью? Выведите из этого заключение, что при свободном и естественном падении малый камень не давит на больший и, следовательно, не увеличивает его веса, как то бывает при покое.

Симпличио. Но если положить больший камень на меньший?

Сальвиати. Он увеличил бы вес меньшего, если бы движение его было более быстрым; но мы уже нашли, что если бы меньший двигался медленнее, то он замедлил бы отчасти движение большего. Таким образом, целое двигалось бы медленнее, будучи больше своей части, что противно вашему положению. Выведем из всего этого, что тела большие и малые, имеющие одинаковый удельный вес, движутся с одинаковой скоростью».

Очень интересно и продолжение этой беседы, и все остальные. Любознательным советую взять в библиотеке «Беседы» Галилея и прочитать их. Там вы найдете много интересных высказываний ученого об ускорении тел, о полете брошенных тел, об ударе и других вопросах механики.

---

[1] Собеседники пользуются старинной единицей измерения массы — унцией; 1 унция ≈ 28,35 г.

Галилей заложил фундамент современной механики, а о путях ее дальнейшего развития вы узнаете из бесед, в которых мы будем говорить об Исааке Ньютоне.

ЧТО ТАКОЕ ИНЕРЦИЯ

Мир полон движения. Движутся звезды, планеты. И на Земле мы всюду видим движение: течет вода в реках, ветер гонит облака и качает деревья, по дорогам едут автомобили, по рельсам — поезда, в воздухе летят самолеты. Наукой доказано движение невидимых глазом частиц — молекул, атомов. Движение есть основное свойство материи.

Механическое движение характеризуется скоростью. И вот другое основное положение: движущееся тело не может само по себе изменить свою скорость. Если на движущееся тело не действуют никакие другие тела, то тело не может ни ускорить, ни замедлить, ни изменить направление своего движения, оно будет двигаться с какой-то определенной по модулю и направлению скоростью. Только воздействие других тел может изменить эту скорость.

Свойство тел сохранять модуль и направление своей скорости называется инерцией.

Галилей первый объяснил явление инерции. Ньютон сформулировал «закон инерции»: всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока действия со стороны других тел не изменят этого состояния.

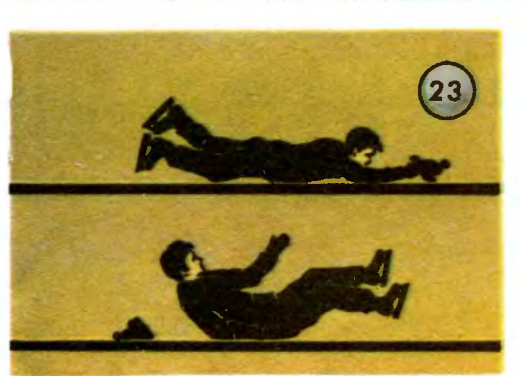
Ни один предмет сам собой не придет в движение. Стоящий в комнате стол никогда сам собой не начнет двигаться по комнате. Движущееся тело не может само собой остановиться. Когда водитель резко затормозит вагон трамвая, то находящиеся в нем пассажиры наклонятся вперед, продолжая движение по инерции. Когда вагон резко тронется с места, пассажиры откачнутся назад. На крутом повороте дороги можно вылететь из саней в сугроб.

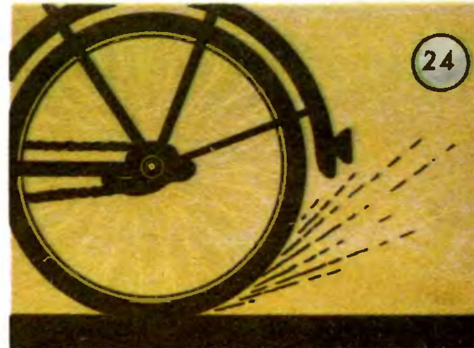
Предоставляем читателям самим объяснить неудачи неопытного конькобежца, изображенного на рисунке 23 («споткнулся», «поскользнулся»).

Число примеров проявления инерции необъятно. Инерция — неотъемлемое свойство движущейся материи.

Как же используется явление инерции в технике? Чтобы ответить на этот вопрос, надо знать, что явление инерции в одних случаях может принести вред, и тогда нашей задачей будет предупредить, устранить или уменьшить этот вред. В других случаях инерцию можно поставить на службу человеку, сделать ее нашим помощником.

Наиболее распространенное движение в технике — вращательное. Такое движение возможно только при наличии связи, удерживающей движущееся тело на окружности. Чтобы заставить, например, камень описывать окружности в воздухе, его на-





до привязать к веревке. При этом, стремясь двигаться по инерции, по прямой линии, касательной к окружности, камень будет натягивать веревку и может ее разорвать. Вследствие инерции слетает грязь с вращающихся колес велосипеда (рис. 24). Быстро вращающийся шкив, маховое колесо, циркулярная пила и вращающиеся части машин могут разорваться. Поэтому специальными расчетами на прочность определяют размеры частей машин и допустимую скорость их вращения.

Ну, а полезное применение инерции? Прежде всего — для продолжения движения. Машинист, ведущий поезд, прекращает работу двигателя на некотором расстоянии до остановки, чтобы поезд прошел это расстояние по инерции. Водители автомашин для экономии бензина часть пути проезжают с выключенным двигателем.

На валах поршневых машин устанавливают маховики, чтобы повысить равномерность вращения вала. В водяных и паровых

турбинах, ветряных двигателях используется инерция движения воды, пара и воздуха. Работа центробежного насоса, центрифуги, веялки, сепаратора — все это примеры использования инерции.

В различных применениях удара. начиная от выколачивания пыли и полоскания белья и кончая различными ударными техническими устройствами, используется инерция.

Представьте на минуту, что произошло бы в мире, если бы мгновенно исчезло свойство тел, которое мы называем инерцией. Луна упала бы на Землю. Планеты упали бы на Солнце. Движение тела могло бы осуществляться только под действием силы и прекращалось бы с исчезновением последней. Исчезновение инерции означало бы исчезновение движения вообще. Таким образом, инерция есть не что иное, как выражение единства материи и движения.

ПОЧЕМУ ЛУНА НЕ ПАДАЕТ НА ЗЕМЛЮ

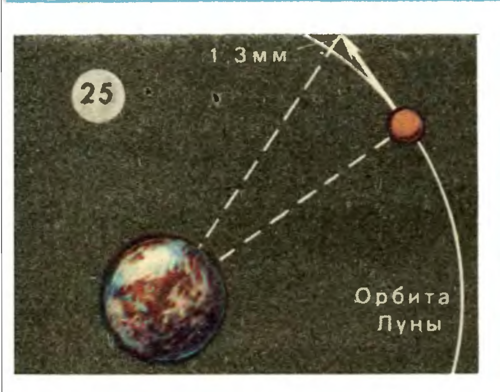
ДОКЛАД НА КРУЖКЕ «ЮНЫЙ ФИЗИК» В VIII КЛАССЕ

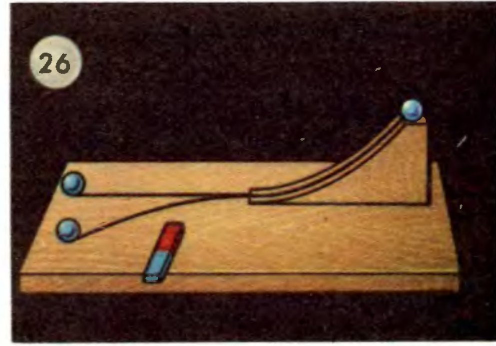
Ученик. Широко известен рассказ о том, что на открытие закона всемирного тяготения Ньютона навело падение яблока с дерева. Насколько достоверен этот рассказ, мы не знаем, но остается фактом, что вопрос, который мы собрались сегодня обсудить: «Почему Луна не падает на Землю?», интересовал Ньютона и привел его к открытию закона тяготения. Ньютон утверждал, что между Землей и всеми материальными телами существует сила тяготения, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния.

Ньютон рассчитал ускорение, сообщаемое Луне Землей. Ускорение свободно падающих тел у поверхности Земли равно $g=9{,}8$ м/с^2. Луна удалена от Земли на расстояние, равное примерно 60 земным радиусам. Следовательно, рассуждал Ньютон, ускорение на этом расстоянии будет: $\frac{9{,}8\frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{60^2}=0{,}0027\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Луна, падая с таким ускорением, должна бы приблизиться к Земле за первую секунду на 0,0013 м. Но Луна, кроме того, движется и по

инерции в направлении мгновенной скорости, т. е. по прямой, касательной в данной точке к ее орбите вокруг Земли (рис. 25).

Двигаясь по инерции, Луна должна удалиться от Земли, как показывает расчет, за одну секунду на 1,3 мм. Разумеется, такого движения, при котором за первую секунду Луна двигалась бы по радиусу к центру Земли, а за вторую секунду — по касательной, в действительности не существует. Оба движения непрерывно складываются. В результате Луна движется по кривой линии, близкой к окружности.





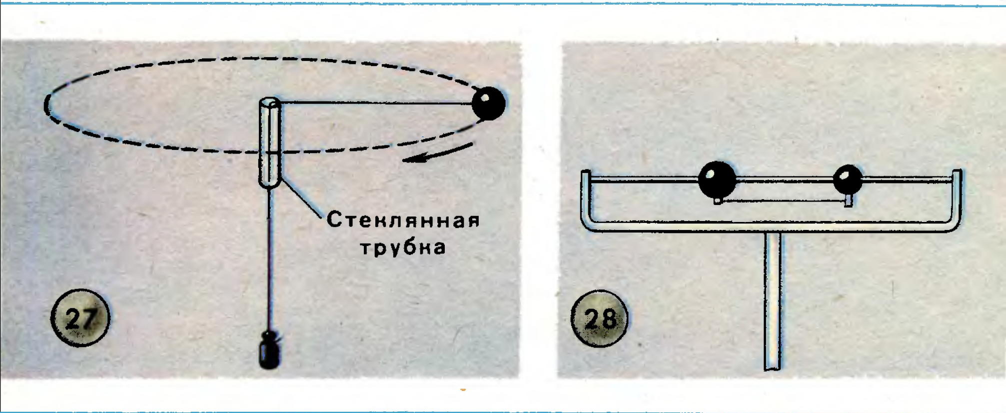
Проведем опыт, из которого видно, как сила притяжения, действующая на тело под прямым углом к направлению его движения, превращает прямолинейное движение в криволинейное. Шарик, скатившись с наклонного желоба, по инерции продолжает двигаться по прямой линии. Если же сбоку положить магнит, то под действием силы притяжения к магниту траектория шарика искривляется (рис. 26).

Луна обращается вокруг Земли, удерживаемая силой притяжения. Стальной канат, который мог бы удержать Луну на орбите, должен был бы иметь диаметр около 600 км. Но, несмотря на такую огромную силу притяжения, Луна не падает на Землю, потому что, имея начальную скорость, движется по инерции.

Зная расстояние от Земли до Луны и число оборотов Луны вокруг Земли, Ньютон определил центростремительное ускорение Луны. Получилось уже известное нам число: 0,0027 м/с^2.

Прекратись действие силы притяжения Луны к Земле — и Луна по прямой линии умчится в бездну космического пространства. Так в устройстве, показанном на рисунке 27, улетит по касательной шарик, если разорвется нить, удерживающая шарик на окружности. В известном вам приборе на центробежной машине (рис. 28) только связь (нитка) удерживает шарики на круговой орбите.

При разрыве нити шарики разбегаются по касательным. Глазом трудно уловить их прямолинейное движение, когда они лишены связи, но если мы сделаем чертеж (рис. 29), то будет



видно, что шарики двигаются прямолинейно, по касательной к окружности.

Прекратись движение по инерции — и Луна упала бы на Землю. Падение продолжалось бы четверо суток девятнадцать часов пятьдесят четыре минуты пятьдесят семь секунд, так рассчитал Ньютон.

Учитель, присутствующий на занятии кружка. Доклад окончен. У кого есть вопросы?

Вопрос. С какой силой Земля притягивает Луну?

Ученик. Это можно определить по формуле, выражающей закон тяготения: $F=G\frac{Mm}{r^2}$, где G — гравитационная постоянная, M и m — массы Земли и Луны, r — расстояние между ними. Я ожидал этого вопроса и сделал вычисление заранее. Земля притягивает Луну с силой около $2 \cdot 10^{20}$ Н.

Вопрос. Закон всемирного тяготения применим ко всем те-

лам, значит, и Солнце тоже притягивает Луну. Интересно, с какой силой?

Ответ. Масса Солнца в 300 000 раз больше массы Земли, но расстояние между Солнцем и Луной больше расстояния между Землей и Луной в 400 раз. Следовательно, в формуле $F = G\frac{Mm}{r^2}$ числитель увеличится в 300 000 раз, а знаменатель — в 400^2, или 160 000 раз. Сила тяготения получится почти в два раза больше.

Вопрос. Почему же Луна не падает на Солнце?

Ответ. Луна падает на Солнце так же, как и на Землю, т. е. лишь на столько, чтобы оставаться примерно на одном расстоянии, обращаясь вокруг Солнца.

— Вокруг Земли!

— Неверно, не вокруг Земли, а вокруг Солнца. Вокруг Солнца обращается Земля вместе со своим спутником — Луной, значит, и Луна обращается вокруг Солнца.

Вопрос. Луна не падает на Землю, потому что, имея начальную скорость, движется по инерции. Но по третьему закону Ньютона силы, с которыми два тела действуют друг на друга, равны по модулю и противоположно направлены. Поэтому, с какой силой Земля притягивает к себе Луну, с такой же силой Луна притягивает Землю. Почему же Земля не падает на Луну? Или она обращается вокруг Луны?

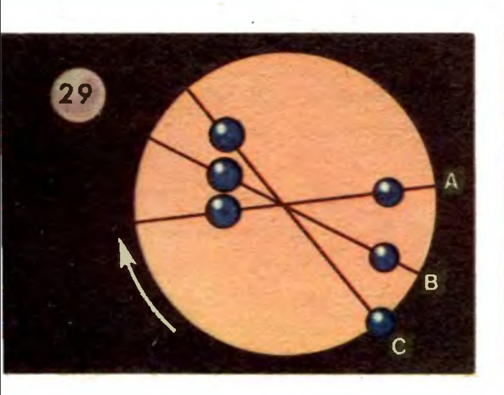
Учитель. Дело в том, что и Луна, и Земля обращаются вокруг общего центра масс. Вспомните опыт с шариками и центробежной машиной. Масса одного из шариков в два раза больше массы другого. Чтобы шарики, связанные ниткой, при вращении оставались в равновесии относительно оси вращения, их расстояния от оси, или центра вращения, должны быть обратно пропорциональны массам. Точка, вокруг которой обращаются эти шарики, называется центром масс двух шариков.

Третий закон Ньютона в опыте с шариками не нарушается: силы, с которыми шарики тянут друг друга к общему центру масс, равны. Общий центр масс Земли и Луны обращается вокруг Солнца.

Вопрос. Можно ли силу, с которой Земля притягивает Луну, назвать весом Луны?

Ученик. Нет, нельзя! Весом тела мы называем вызванную притяжением Земли силу, с которой тело давит на какую-нибудь опору, чашку весов например, или растягивает пружину дина-

мометра. Если подложить под Луну (со стороны, обращенной к Земле) подставку, то Луна на нее не будет давить. Не будет Луна растягивать и пружину динамометра, если бы мы смогли ее подвесить. Все действие силы притяжения Луны Землей выражается лишь в удержании Луны на орбите, в сообщении ей центростремительного ускорения. Про Луну можно сказать, что по отношению к Земле она невесома так же, как невесомы предметы в космическом корабле-спутнике, когда прекращается работа двигателя и на корабль действует только сила притяжения к Земле.





Вопрос. Где находится центр масс системы Земля — Луна?

Ответ. Расстояние от Земли до Луны составляет 384 000 км. Отношение массы Луны к массе Земли равно 1:81. Расстояния от центра масс до центров Луны и Земли будут обратно пропорциональны этим числам. Разделив 384 000 км на 82, получим примерно 4700 км. Значит, центр масс находится на расстоянии 4700 км от центра Земли.

— А чему равен радиус Земли?

— Около 6400 км.

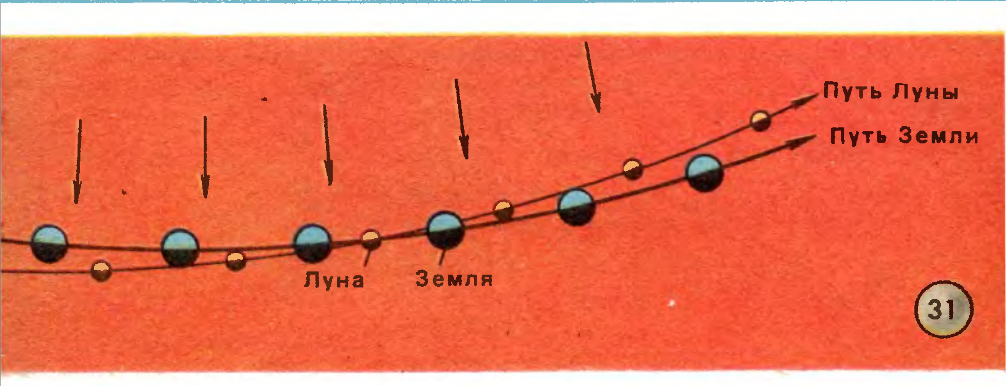
— Следовательно, центр масс системы Земля — Луна лежит внутри земного шара (рис. 30, точка O). Поэтому, если не гнаться за точностью, можно говорить об обращении Луны вокруг Земли.

Вопрос. Что легче: улететь с Земли на Луну или с Луны на Землю?

Ответ. Чтобы ракета стала искусственным спутником

Земли, ей надо сообщить начальную скорость, приблизительно равную 8 км/с. Чтобы ракета вышла из сферы притяжения Земли, нужна так называемая вторая космическая скорость, равная 11,2 км/с. Для запуска ракет с Луны нужна меньшая скорость: ведь сила тяжести на Луне в шесть раз меньше, чем на Земле.

Вопрос. Я плохо понимаю, почему внутри ракеты тела не имеют веса. Может быть, это только в той точке на пути к Луне, в которой сила притяжения к Луне уравновешивается силой притяжения к Земле?



Учитель. Нет. Тела внутри ракеты становятся невесомыми с того момента, когда прекращают работу двигатели и ракета начинает свободный полет по орбите вокруг Земли, находясь при этом в поле тяготения Земли. При свободном полете вокруг Земли и спутник, и все предметы в нем относительно центра массы Земли движутся с одинаковым центростремительным ускорением и потому невесомы.

Далее учитель обращает внимание на два вопроса, которые имеют большое значение для всего курса физики.

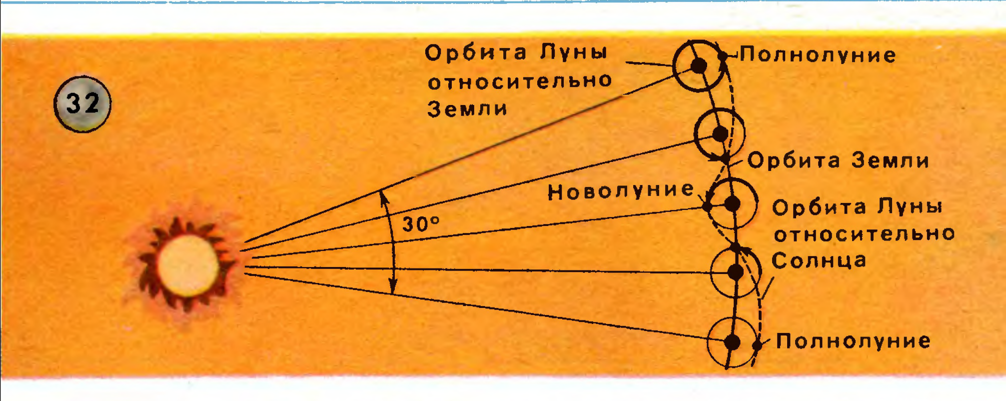
1-й вопрос. Как двигались не связанные ниткой шарики на центробежной машине: по радиусу или по касательной к окружности?

Ответ зависит от выбора системы отсчета, т. е. от выбора того тела, относительно которого мы рассматриваем движение шариков. Если за систему отсчета принять поверхность стола, то шарики двигались по касательным к описываемым ими окруж-

ностям. Если же принять за систему отсчета сам вращающийся прибор, то шарики двигались по радиусу. Без указания системы отсчета вопрос о характере движения не имеет смысла. Двигаться — значит перемещаться относительно других тел, и мы должны обязательно указывать, относительно каких именно.

2-й вопрос. Вокруг чего обращается Луна?

Если рассматривать движение относительно Земли, то Луна обращается вокруг Земли. Если же за тело отсчета принять Солнце, то — вокруг Солнца. Поясню сказанное рисунком из книги «Занимательная астрономия» Перельмана (рис. 31). Скажите,



относительно какого тела показано здесь движение небесных тел.

— Относительно Солнца.

— Верно. Но нетрудно заметить, что Луна все время меняет свое положение и относительно Земли.

Голос с места. А не могут ли Земля и Луна столкнуться? Ведь их орбиты вокруг Солнца пересекаются.

Учитель. Конечно, не могут. При положении Земли или Луны (заметьте, я говорю «или», а не «и») в пункте пересечения показанных орбит расстояние между Землей и Луной составляет 380 000 км. Чтобы лучше в этом разобраться, начертите к следующему занятию диаграмму этого сложного движения. Орбиту Земли изобразите в виде дуги окружности радиусом 15 см (расстояние от Земли до Солнца, как известно, равно 150 000 000 км). На дуге, равной 1/12 части окружности (месячный путь Земли), отметьте на равных расстояниях пять точек,

считая и крайние. Эти точки будут центрами лунных орбит относительно Земли в последовательные четверти месяца. Радиус лунных орбит нельзя изобразить в том же масштабе, в каком вычерчена орбита Земли, так как он будет слишком мал. Чтобы начертить лунные орбиты, надо выбранный масштаб увеличить примерно в десять раз, тогда радиус лунной орбиты составит около 4 мм. Укажите на каждой орбите положение Луны, начав с полнолуния, и соедините отмеченные точки плавной пунктирной линией.

На следующем занятии кружка одна из учениц показала требуемую диаграмму (рис. 32).

Рассказ ученицы, чертившей диаграмму: «Я многому научилась, пока рисовала эту диаграмму. Надо было правильно определить положение Луны в ее фазах, подумать о направлении движения Луны и Земли по их орбитам. В чертеже есть неточности. О них я сейчас скажу. При выбранном масштабе неправильно изображена кривизна лунной орбиты. Она должна быть все время вогнута по отношению к Солнцу, т. е. центр кривизны должен находиться внутри орбиты. Кроме того, в году не 12 лунных месяцев, а больше. Но одну двенадцатую часть окружности легко построить, поэтому я условно приняла, что в году 12 лунных месяцев. И наконец, вокруг Солнца обращается не сама Земля, а общий центр масс системы Земля — Луна».

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАЧАЛА НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ»

В 1642 году умер Галилей, в 1643 году родился Ньютон. В 1687 году была издана гениальная книга Ньютона «Математические начала натуральной философии».

Титульный лист этой книги изображен на рисунке 33. Академик С. И. Вавилов в биографии Ньютона писал: «В истории естествознания не было события более крупного, чем появление «Начал» Ньютона. Причина была в том, что эта книга подводила итоги всему сделанному за предшествующие тысячелетия в учении о простейших формах движения материи». «...Возникла «классическая физика» по образу и подобию «Начал», продолжавшая свое победное развитие в течение веков до нашего времени».

Что же это за книга, получившая такой восторженный отзыв? Кто был ее автор? Надгробная эпитафия так отвечает на второй вопрос:

«Здесь покоится сэр Исаак Ньютон, дворянин, который... первый доказал с факелом математики движение планет, пути комет и приливы океанов.

Он исследовал различие световых лучей и проявляющиеся при этом различные свойства цветов, чего ранее никто не подозревал. ...Пусть смертные радуются, что существовало такое украшение рода человеческого».

Попытаемся очень кратко рассказать о Ньютоне.

Личная жизнь Ньютона была не богата событиями. На ней, по-видимому, не отразились политические бури, которые потрясали в тот век его родину. А между тем в Англии за долгую, восьмидесятилетнюю жизнь Ньютона произошли две революции, сменилось шесть королей. Ньютон был современником Петра I и Людовика XIV.

Окончив университет, Ньютон получил ученое звание бакалавра, затем магистра. С 1669 года стал во главе кафедры физики и математики в Кембриджском университете. Внешне жизнь Ньютона протекала спокойно, мирно и однообразно. Но ее заполняли непрестанный труд, математические изыскания, физические и химические опыты, вызывавшие восхищение его современников. Имя Ньютона еще при жизни было окружено ореолом национального героя.

Плодами его неутомимой деятельности явились «Метод флюксий и бесконечные ряды» (основы дифференциального и интегрального исчисления — по принятой теперь терминологии), «Оптика» и «Математические начала натуральной философии», определившие все дальнейшее развитие науки. Давая общую оценку роли Ньютона в науке, академик С. И. Вавилов писал: «На всей физике лежал отпечаток его мысли, без Ньютона наука развивалась бы иначе».

«Математические начала натуральной философии». Почему так назвал свою книгу Ньютон? Название «натуральная философия» в значении «физика» сохранилось в английском языке до сих пор (наряду с термином physics[1]). Это название довольно точно передает содержание физики как науки, изучающей про-

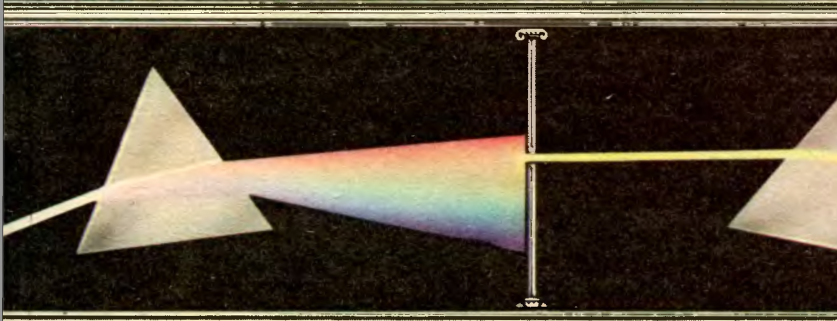
---

[1] Заметьте, что по-английски physic (без s) означает «медицина».





Исаак Ньютон
(1643-1727)



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Aulore J.S. NEWTON, Trin Coll

IMPRIMATUR
S. PEPIS, Rog. Soc PRÆSES

LOVDINA

MDCLXXXVII



стейшие и наиболее общие свойства материи и формы ее движения.

Почему эти «Начала» математические?

Ньютон, великий физик, был в то же время не менее великим математиком, физику он хотел построить по образу и подобию геометрии: из нескольких аксиом (принципов, основных положений), представляющих обобщение многовекового опыта человечества, математическим путем вывести теоремы и правила.

Замысел «Начал» — доказать, что закон всемирного тяготения неизбежно вытекает из применения принципов механики к движениям небесных тел. Книга состоит из трех частей. Во введении читатель найдет определения основных физических понятий: массы, количества движения, силы и др. Эти понятия сопровождаются соответствующими пояснениями или «поучениями». Затем следуют аксиомы, или законы движения. Каждый из трех законов, как и каждое определение, сопровождается пояснениями, затем идут следствия из закона и общее «поучение». В первой части, или первой книге, Ньютон описал движения тел под влиянием только отдельных сил, во второй части — те же движения в сопротивляющейся среде. Первая и вторая книги представляют собой энциклопедию физических знаний того времени. Написав первые две части, Ньютон хотел на этом остановиться. Но для большинства современников Ньютона в таком виде она осталась бы малопонятной, поэтому ученым была написана третья часть — «О системе мира».

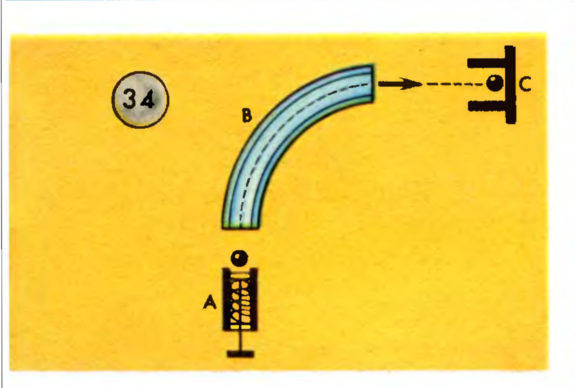
Книгу читать нелегко. Сам Ньютон рекомендовал лицам, не имеющим глубоких математических знаний, ограничиться выборочным чтением. «Достаточно,— пишет он,— если кто тщательно прочтет определения, законы движения и первые три отдела 1-й книги и затем перейдет к 3-й книге о системе мира; из прочих же предложений предыдущих книг, если того пожелает, будет справляться в тех, на которые есть ссылки».

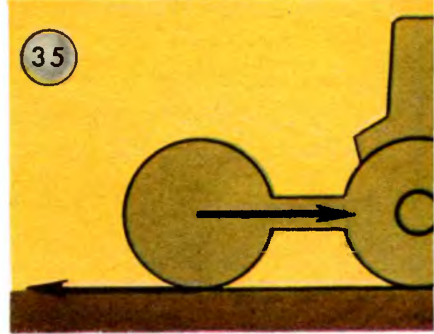
Повторим три основных закона Ньютона.

«Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние». Это дословная формулировка закона, записанная в «Началах» самим Ньютоном. Но все ли понятно в такой формулировке? Что означают, например, слова «пока и поскольку»? Даже академик А. Н. Крылов, переводя этот закон с латинского

языка на русский, признавал, что ему трудно было подобрать русские слова для глубоко выразительной мысли Ньютона, записанной по-латыни. По Ньютону, этот закон объединяют два понятия: стойкость, или упорство, в сохранении телом данного состояния и продолжительность сохранения этого состояния. Разделив эти понятия, можно было бы сформулировать два закона:

«Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока приложенные силы не изменят этого состояния».





«Всякое тело удерживает свое состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние».

Сейчас мы избегаем приписывать телам какое-то «упорство» и формулируем первый закон Ньютона так: «Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, если действие со стороны других тел не изменяет этого состояния».

Можно самим сконструировать приборы, подобрать интересные примеры из техники о применении законов Ньютона, составить задачи. На рисунке 34 изображен простой прибор, иллюстрирующий первый закон Ньютона, согласно которому свободное движение тела может происходить только по прямой линии, в направлении вектора скорости. Прибор действует так: под действием упругой силы сжатой пружины шарик по инерции движется в горизонтальной плоскости от трубки *A* до трубки *B*. Движе-

ние по инерции — это движение по прямой линии. Трубка *В* изогнута по дуге окружности. Поэтому шарик, пройдя трубку *В*, дальше движется по касательной к этой окружности и попадает в трубку *С*.

Теперь ответьте на такие вопросы: «Неужели тело движется равномерно и прямолинейно только в том случае, когда на него совсем не действуют силы?», «Почему практически равномерно и прямолинейно перемещает сеялку трактор?»

— Трактор передвигает сеялку равномерно и прямолинейно, если сила тяги равна по модулю силе преодолеваемого трения (рис. 35). Вообще, если на тело действуют уравновешенные силы, то тело будет оставаться в покое или двигаться равномерно и прямолинейно. В этом случае нет причины, которая изменяла бы движение, т. е. изменяла бы скорость по модулю или направлению.

Обратимся ко второму закону Ньютона. «Сила, действующая на тело, равна произведению массы тела на сообщаемое этой силой ускорение», говорится в учебнике. Ньютон несколько по-другому сформулировал этот закон: «Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует». Импульсом (количеством движения) называется произведение массы тела на скорость. Математически второй закон Ньютона можно записать так:

$$\Delta(mv) = F\Delta t\ .$$

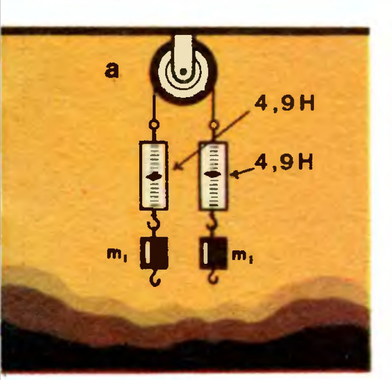
Знак Δ (дельта) обозначает малое изменение (приращение или убыль) чего-нибудь. Так $\Delta(mv)$ есть изменение импульса, F — постоянная сила, Δt — приращение, или промежуток времени, в течение которого происходит данное изменение импульса.

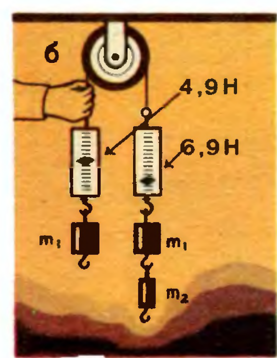
Третий закон Ньютона иногда формулируют так: «Всякому действию всегда есть равное и прямо противоположное противодействие». Как это понимать? Предположим, что тело *А* действует на тело *Б* с силой $\vec{F}_1$. Согласно третьему закону Ньютона должна обязательно существовать ответная сила — $\vec{F}_2$, с какой тело *Б* действует на тело *А*. При этом сила $\vec{F}_2$ равняется по модулю силе $\vec{F}_1$, но имеет противоположное направление:

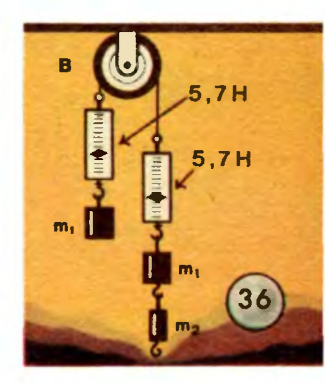
$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1.$$

Подчеркнем, что рассматриваемые силы приложены к разным телам: сила $\vec{F}_1$ приложена к телу *Б*, а сила $\vec{F}_2$ к телу *А*. Поэтому было бы ошибочно полагать, что эти силы, складываясь, взаимно уничтожаются. Ведь складывать можно лишь силы, приложенные к одному и тому же телу.

Второй и третий законы Ньютона можно продемонстрировать на следующем приборе (рис. 36). Через блок перекинута нить, к концам которой подвешены динамометры, а к динамометрам одинаковые грузы массой $m_1 = 0{,}5$ кг каждый. Массой динамометров будем пренебрегать, полагая, что эта масса не превышает







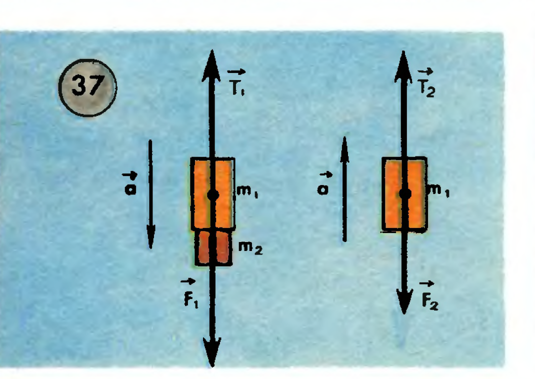
нескольких граммов. Система грузов уравновешена и неподвижна. Каждый динамометр фиксирует силу $m_1g = 4{,}9$ Н (рис. 36, *а*). Подвесим к правому грузу дополнительный груз массой $m_2 = 0{,}2$ кг. Если при этом удерживать нить рукой так, чтобы система грузов оставалась неподвижной, то правый динамометр зафиксирует силу $(m_1 + m_2)g = 6{,}9$ Н, тогда как левый будет по-прежнему показывать 4,9 Н (рис. 36, *б*). Если же убрать руку, то система грузов начнет двигаться с некоторым ускорением; при этом показания обоих динамометров будут одинаковыми и, как показывает опыт, будут составлять 5,7 Н (рис. 36, *в*). Чтобы объяснить этот результат, надо воспользоваться законами Ньютона.

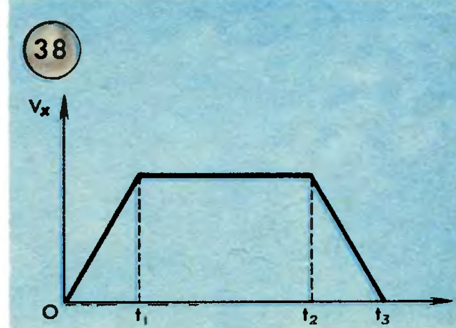
Сначала найдем ускорение *а* рассматриваемой системы. Она ускоряется под действием силы тяжести дополнительного груза, т. е. под действием силы $m_2\vec{g}$. Масса всей системы грузов равна $2m_1 + m_2$.

Согласно второму закону Ньютона получаем, что

$$a = \frac{m_2 g}{2m_1 + m_2}.$$

Будем рассматривать правый груз m_1 и дополнительный груз m_2 как единое тело. Силы, приложенные к этому телу, показаны на рисунке 37 слева. Этих сил две: сила тяжести $\vec{F}_1 = (m_1 + m_2)\vec{g}$ и сила $\vec{T}_1$, с которой динамометр действует на рассматриваемое тело. По третьему закону Ньютона с такой же по модулю силой тело действует на динамометр; следовательно, сила





T_1 соответствует показанию правого динамометра. Используя рисунок, запишем в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$F_1 - T_1 = (m_1 + m_2)a.$$

Отсюда следует, что

$$T_1 = F_1 - (m_1 + m_2)a = (m_1 + m_2)g - (m_1 + m_2)\frac{m_2 g}{2m_1 + m_2} =$$
$$= \frac{2m_1(m_1 + m_2)g}{2m_1 + m_2};$$

$$T_1 = 5{,}7 \text{ Н}.$$

Теперь рассмотрим левый груз массой m_1. Силы, приложенные к нему, показаны на рисунке 37 справа; $\vec{F}_2 = m_1\vec{g}$, сила T_2 соответствует показанию левого динамометра. Согласно второму

закону Ньютона

$$T_2 - F_2 = m_1 a.$$

Отсюда

$$T_2 = F_2 + m_1 a = m_1 g + m_1 \frac{m_2 g}{2m_1 + m_2} = \frac{2m_1(m_1 + m_2)g}{2m_1 + m_2};$$

$$T_2 = 5{,}7 \text{ Н}.$$

Как и следовало ожидать, $T_1 = T_2$. Это объясняется тем, что массами динамометров мы пренебрегали и, кроме того, полагали, что натяжение нити одинаково по обеим сторонам блока.

Заметим, что вопрос о натяжении нити, шнура или троса не простой. Поэтому в заключение мы решим с вами еще одну задачу. Запишите ее условие.

«Определить силу натяжения каната в начале подъема кабины лифта, при установившемся равномерном движении, в конце подъема. Масса кабины с пассажирами 1500 кг. Ускорение кабины в начале и конце подъема одинаково и по модулю равно 1,7 м/с^2».

Зачем здесь дано ускорение, почему лифт идет то ускоренно, то равномерно? При посадке пассажиров лифт был неподвижен, т. е. начальная скорость его была равна нулю. Чтобы достичь какой-то скорости v, необходимо некоторое время. Как бы мало оно ни было, движение за этот промежуток времени было ускоренным; оно характеризовалось ускорением $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$. Вот об этом ускорении и сказано в условии задачи, что оно равно 1,7 м/с^2. Точно так же и остановка никогда не бывает мгновенной, какие бы тормоза ни замедляли движение.

На рисунке 38 изображен график скорости поднимающейся кабины лифта. В течение промежутка времени от 0 до t_1 движение кабины равноускоренное; от t_1 до t_2 кабина движется равномерно; от t_2 до t_3 кабина движется равнозамедленно. В момент времени t_3 кабина останавливается.

На кабину лифта действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}$ (она направлена вертикально вниз) и сила натяжения $\vec{T}$ со стороны каната (она направлена вверх). По третьему закону Ньютона кабина лифта действует на канат с силой, модуль которой равен модулю силы, с которой канат действует на кабину. Это и есть искомая сила натяжения каната.

Когда кабина лифта движется равномерно, силы $\vec{F}$ и $\vec{T}$, приложенные к кабине, взаимно уравновешены; в этом случае

$$T=F=mg; \quad T=1500 \text{ кг} \cdot 9{,}8 \text{ м/с}^2=14\,700 \text{ Н}.$$

В начале подъема кабина имеет ускорение $a=1{,}7$ м/с². Согласно второму закону Ньютона

$$a=\frac{T-F}{m};$$

следовательно,

$$T=F+ma; \quad T=14\,700 \text{ Н}+1500 \text{ кг} \cdot 1{,}7 \text{ м/с}^2=17\,250 \text{ Н}.$$

В конце подъема кабина движется равнозамедленно. Это означает, что, хотя она продолжает двигаться вверх, однако ее ускорение направлено при этом вниз. В данном случае

$$a=\frac{F-T}{m};$$

следовательно,

$$T=F-ma; \quad T=14\,700 \text{ Н}-1500 \text{ кг} \cdot 1{,}7 \text{ м/с}^2=12\,150 \text{ Н}.$$

Заметим, что равенства $a=\frac{T-F}{m}$ и $a=\frac{F-T}{m}$ могут быть записаны единым образом, если воспользоваться векторами:

$$\vec{a}=\frac{\vec{T}+\vec{F}}{m}.$$

Спроецируем это векторное равенство на ось координат, направленную вертикально вверх. Проекция вектора $\vec{T}$ есть, очевидно, T, а проекция вектора $\vec{F}$ есть $-F$. Что касается вектора $\vec{a}$, то в начале подъема лифта он направлен вверх и, следовательно, его проекция есть a, тогда как в конце подъема этот вектор направлен вниз и, следовательно, его проекция есть $-a$. В первом случае получаем:

$$a=\frac{T-F}{m},$$

а во втором случае получаем:

$$-a=\frac{T-F}{m}, \text{ или, иначе, } a=\frac{F-T}{m}.$$

ИМПУЛЬС — ЗНАЧИТ ТОЛЧОК

Загляните в словарь иностранных слов: «импульс — от лат. impulsus — толчок, удар, побуждение». Эффект, производимый ударом, всегда вызывал удивление у человека. Почему тяжелый молот, положенный на кусок металла на наковальне, только прижимает его к опоре, а тот же молот ударом молотобойца плющит металл? А в чем секрет старого циркового трюка, когда сокрушительный удар молота по массивной наковальне не наносит никакого вреда человеку, на груди которого установлена эта наковальня? В чем ошибка в вопросе, который задал однажды один ученик: «Какова сила удара при падении груза массой 20 кг с высоты 10 м?» И что значит само выражение «сила удара»?

Еще Галилей интересовался проблемой «удивительной силы удара». Он описывает остроумный опыт, при помощи которого он пытался определить «силу удара». Опыт состоял в следующем: к прочному брусу, укрепленному горизонтально на оси подобно коромыслу весов (рис. 39), подвешены с одного конца два ведра, а с другого — груз (камень), уравновешивающий их. Верхнее ведро было наполнено водой, в дне этого ведра было проделано отверстие, закрытое пробкой.

Если вынуть пробку, то вода будет выливаться в нижнее ведро и сила удара струи о дно этого ведра, казалось бы, заставит правую часть коромысла опуститься. Добавка соответствующего груза слева восстановит равновесие, а его масса позволит оценить, какова сила удара струи.

Однако, к удивлению Галилея, опыт показал совершенно иное. Сначала, как только была вынута пробка и вода начала выливаться, опустилась не правая, а левая часть коромысла. И лишь когда струя достигла дна нижнего ведра, равновесие восстановилось и уже больше не нарушалось до конца опыта.

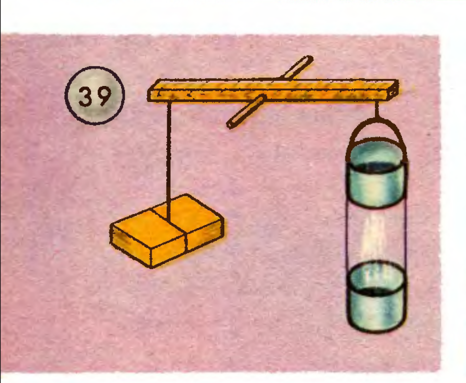
Как же объяснить этот «странный» результат? Разве ошибочно первое предположение Галилея о том, что струя, ударяя о дно нижнего ведра, заставит его опускаться? Для понимания этого довольно сложного вопроса надо знать закон сохранения количества движения, который вместе с законом сохранения энергии относится к величайшим законам природы.

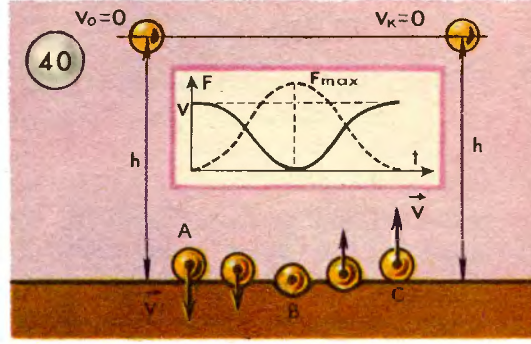
Термин «количество движения» был введен современником Галилея — французским философом и математиком Декартом, но

введен далеко не на научном основании, а из метафизических (не основанных на опыте) религиозных идей философа. Неопределенный, туманный термин «количество движения» заменяют сейчас термином «импульс».

В предыдущей беседе мы приводили формулировку второго закона Ньютона в том виде, какой ему дал сам Ньютон: «Изменение количества движения пропорционально движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует».

Ньютон первый ввел в механику понятие массы и, поль-





зуясь им, дал точное определение количества движения как произведения массы тела на его скорость (mv).

Если начальная скорость v_0 тела массой m под действием какой-либо силы в течение времени t увеличивается до v_1, то изменение количества движения за единицу времени будет:

$$\frac{mv_1-mv_0}{t}.$$

Это изменение пропорционально приложенной силе F:

$$F=\frac{mv_1-mv_0}{t},$$

или

$$mv_1-mv_0=Ft.$$

Это и есть второй закон Ньютона. Из него следует, что одно и то же изменение количества движения может произойти и при продолжительном действии малой силы, и при кратковременном

действии большой силы. Произведение Ft можно рассматривать как меру действия силы. Оно получило название **импульс силы**. Не смешивайте только импульс силы с самой силой, а также с импульсом. Из приведенной формулы видно, что импульс силы равен не самому количеству движения, а изменению количества движения. Иными словами, импульс силы за время t равен изменению импульса тела за это время. Импульс обозначают обычно буквой p:

$$p = mv.$$

В общем случае надо учитывать, что импульс является векторной физической величиной:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Выше мы уже упоминали о двух величайших законах природы: законе сохранения импульса и законе сохранения энергии. Эти законы удобно продемонстрировать на примере удара. Явление удара имеет огромное значение в науке и технике. Рассмотрим это явление внимательнее.

Мы различаем материалы упругие и неупругие. Например, резиновый мячик упругий; это значит, что после прекращения действия деформирующей силы (сжатия или растяжения) он вновь возвращается к первоначальной форме. Наоборот, кусок глины, смятый рукой, к первоначальной форме не возвращается. Резина, сталь, мрамор, кость относятся к упругим материалам. Вы легко убедитесь в упругости стального шарика, уронив его с некоторой высоты на упругую же опору. Если шарик был предварительно закопчен, то на опоре останется след не в виде точки, а в виде достаточно различимого пятнышка, так как при ударе шарик смялся, хотя затем, отскочив, восстановил свою форму. Деформируется и опора. Возникающая при этом упругая сила действует со стороны опоры на шарик и постепенно уменьшает его скорость, сообщая ему ускорение, направленное вверх. При этом направление скорости шарика меняется на противоположное и он взлетает над опорой на ту же высоту, с какой упал (идеальный случай при идеальной упругости соударяющихся тел). Сама опора, как связанная с имеющей огромную массу Землей, практически остается неподвижной.

Последовательные изменения формы шарика и поверхности опоры для разных моментов времени показаны на рисунке 40.

Шарик падает с высоты h и в момент приземления (положение A на рисунке) имеет скорость $v=\sqrt{2gh}$, направленную вертикально вниз. В положении B деформация шарика максимальна; в этот момент его скорость равна нулю, а сила F, действующая на шарик со стороны плоскости опоры, максимальна: $F=F_{max}$. Затем сила F начинает уменьшаться, а скорость шарика расти; точка C соответствует моменту, когда значение скорости $v=\sqrt{2gh}$. В отличие от состояния A теперь скорость направлена вертикально вверх, вследствие чего шарик взлетает (подскакивает) на высоту h.

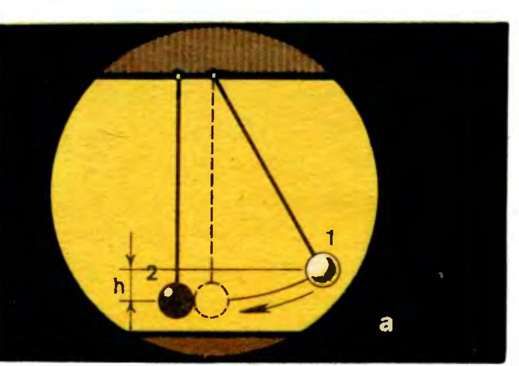
Предположим, что упругий шарик, движущийся с некоторой скоростью, сталкивается с неподвижным шариком такой же массы. Действие неподвижного шарика сводится опять к уменьшению скорости первого шарика и остановке его. В то же время первый шарик, действуя на второй, сообщает ему ускорение и увеличивает его скорость до своей первоначальной скорости. Описывая это явление, говорят, что первый шарик передал второму свой импульс. Вы легко можете проверить это на опыте с двумя шариками, подвешенными на нитях (рис. 41). Измерить скорость, с которой движутся шарики, конечно, трудно. Но можно воспользоваться известным положением, что скорость, приобретаемая падающим телом, зависит от высоты падения ($v=\sqrt{2gh}$). Если не считать небольших потерь энергии вследствие неполной упругости шаров, то шар *2* взлетит от соударения с шаром *1* на такую же высоту, с какой упал шар *1*. При этом шар *1* остановится. Сумма импульсов обоих шаров остается, таким образом, все время постоянной.

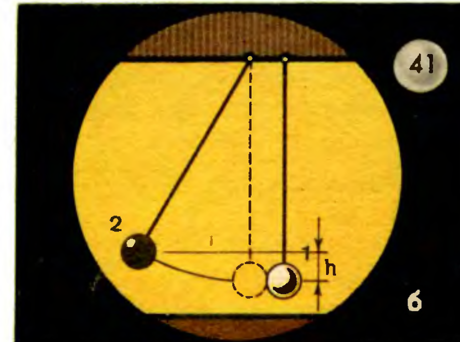
Можно доказать, что закон сохранения импульса соблюдается при взаимодействии многих тел. Если на систему тел не действуют внешние тела, то взаимодействие тел внутри такой замкнутой системы не может изменить ее полного импульса. Вы теперь можете «на научной основе» опровергнуть хвастливые россказни барона Мюнхгаузена, уверявшего, что ему удалось вытащить себя из болота за свои собственные волосы.

Возвращаясь к знаменитому опыту Галилея, с которого мы начали нашу беседу, мы теперь не будем удивляться результату опыта: в отсутствие внешних сил импульс всей системы не мог измениться и потому брус оставался в равновесии, несмотря на удар струи о дно второго ведра. Подробный математический анализ опыта довольно сложен: надо подсчитать уменьшение

массы верхнего ведра, из которого выливается струя воды, реакцию вытекающей струи и, наконец, импульс, сообщаемый дну нижнего ведра ударом струи. Подсчет показывает, что сумма всех импульсов с учетом их знаков равна нулю, как было до вытаскивания пробки, и вся система — брус, ведра, противовес — остается в равновесии.

Закон сохранения импульса и закон сохранения энергии являются основными законами природы. Заметим, однако, что сохранение импульса в механических процессах справедливо всегда и безусловно, в то время как при применении закона сохра-





нения энергии в механике надо быть осторожным (справедливость его требует соблюдения некоторого условия). «Не может быть! — возмущенно воскликнете вы,— закон сохранения энергии справедлив всегда и везде!» А я и не спорю, но читайте дальше. Рассмотрим пример столкновения упругих и неупругих шаров.

Упругий удар. Пусть шар массой 2 кг движется со скоростью 10 м/с и ударяет по второму (неподвижному) шару такой же массы. Как мы уже знаем, после удара первый шар остановится, а второй будет двигаться со скоростью первого шара до столкновения.

Проверим закон сохранения импульса:

Сумма импульсов до удара:	Сумма импульсов после удара:
$2\ \text{кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} + 0 = 20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.	$0 + 2\ \text{кг} \cdot 10 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 20 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

Закон сохранения энергии:

Сумма энергий до удара:

$$\frac{2\ \text{кг} \cdot 100\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2} + 0 = 100\ \text{Дж}.$$

Сумма энергий после удара:

$$0 + \frac{2\ \text{кг} \cdot 100\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2} = 100\ \text{Дж}.$$

Оба закона соблюдены.

Неупругий удар (шары из мягкой глины или замазки). После удара слипшиеся шары продолжают двигаться вместе, но со скоростью, вдвое меньшей скорости первого шара до удара.

Закон сохранения импульса:

Сумма импульсов до удара:

$$2\ \text{кг} \cdot 10\frac{\text{м}}{\text{с}} + 0 = 20\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Сумма импульсов после удара:

$$4\ \text{кг} \cdot 5\frac{\text{м}}{\text{с}} = 20\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Закон соблюдается.

Закон сохранения энергии:

Сумма энергий до удара:

$$\frac{2\ \text{кг} \cdot 100\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2} + 0 = 100\ \text{Дж}.$$

Сумма энергий после удара:

$$\frac{4\ \text{кг} \cdot 25\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2} = 50\ \text{Дж!}$$

До удара энергия была равна 100 Дж, а после удара 50 Дж! Куда же девалась половина энергии? Вы, наверное, догадались: механическая энергия, равная 50 Дж, превратилась во внутреннюю энергию: после удара молекулы стали двигаться более оживленно — шары нагрелись. Если бы мы могли учесть все виды энергии до и после удара, то убедились бы, что и в случае неупругого удара закон сохранения энергии не нарушается. Закон сохранения энергии справедлив всегда, но надо учитывать возможность превращения энергии из одного вида в другой. В практических случаях применения законов сохранения энергии и импульса это особенно важно. Рассмотрим несколько примеров применения этих законов.

Поковка изделий в кузнечном цехе. Цель поковки — изменить форму изделия при помощи ударов молота. Для наилучшего использования кинетической энергии падающего молота необходимо

класть изделие на наковальню большой массы. Такая наковальня получит ничтожно малую скорость, и бóльшая часть энергии при ударе превратится в энергию деформации (форма изделия изменится).

Забивка свай. В этом случае желательно передать бóльшую часть кинетической энергии свае, чтобы она могла совершить работу по преодолению сопротивления грунта и углубиться в грунт. Масса копровой бабы, т. е. груза, который падает на сваю, должна быть больше массы сваи. В соответствии с законом сохранения импульса скорость сваи в этом случае будет больше и свая глубже уйдет в грунт.

О силе удара. В задаче, поставленной в начале нашей беседы, не указана продолжительность удара, а последняя зависит от природы опоры. При жесткой опоре продолжительность удара будет меньше, а средняя сила удара больше; при мягкой опоре наоборот. Сетка, протянутая под трапецией в цирке, предохраняет воздушного гимнаста от сильного удара при падении. Футболист, принимая удар мяча, должен подаваться назад, тем самым увеличивая продолжительность удара,— это смягчит удар. Таких примеров можно привести много. В заключение рассмотрим еще одну интересную задачу, которая после всего вышесказанного будет понятна вам.

«Две лодки движутся по инерции в спокойной воде озера навстречу друг другу параллельным курсом со скоростью $v_1=6$ м/с. Когда они поравнялись, то с первой лодки на вторую быстро переложили груз. После этого вторая лодка продолжала двигаться в прежнем направлении, но со скоростью $v_2=4$ м/с.

Определить массу M_2 второй лодки, если масса M_1 первой без груза равна 500 кг, а масса m груза 60 кг. Подсчитать запас энергии лодок и груза до и после перекладывания груза. Объяснить, почему изменился этот запас энергии».

Решение. До встречи импульс первой лодки равен: $(M_1+m)v_1$, а импульс второй лодки: M_2v_1.

При перекладывании груза из первой лодки во вторую скорость первой лодки не изменяется, так как она испытывает толчок в боковом направлении (отдача), который не может преодолеть сопротивление воды. Скорость же второй лодки меняется, так как переложенный груз должен резко изменить направление своей скорости на противоположное, что можно рассматривать как толчок.

Применяя закон сохранения импульса, пишем:

$$(M_1+m)v_1-M_2v_1=M_1v_1-(M_2+m)v_2 .$$

Откуда

$$M_2=\frac{m(v_1+v_2)}{v_1-v_2}=300 \text{ кг}.$$

Энергия лодок до встречи:

$$E_1=\frac{(M_1+M_2+m)\,v_1^2}{2}=15\,500 \text{ Дж},$$

после перекидывания груза:

$$E_2=\frac{M_1v_1^2}{2}+\frac{(M_2+m)v_2^2}{2}=12\,000 \text{ Дж}.$$

Энергия уменьшилась на 3500 Дж. Куда же девалась энергия? Потерянная часть механической энергии превратилась во внутреннюю энергию (в теплоту) при выравнивании скоростей груза и второй лодки.

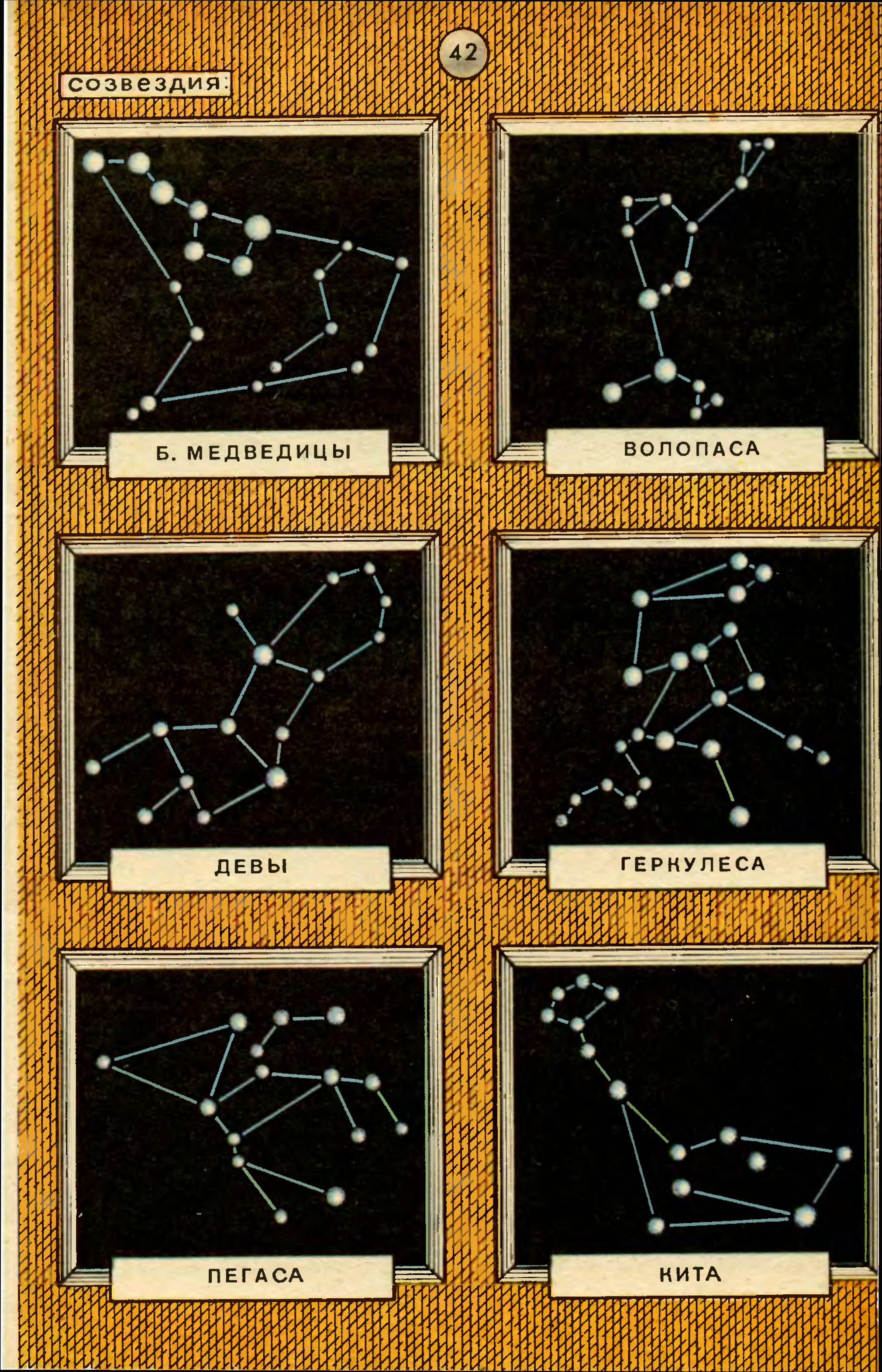
ЧЕЛОВЕК НЕ ВСЕГДА ОСТАНЕТСЯ НА ЗЕМЛЕ

ОТКРЫЛАСЬ БЕЗДНА, ЗВЕЗД ПОЛНА

Открылась бездна, звезд полна,
Звездам числа нет, бездне — дна.
. . . .
Так я, в сей бездне углублен,
Теряюсь, мыслью утомлен...
(М. В. Ломоносов.)

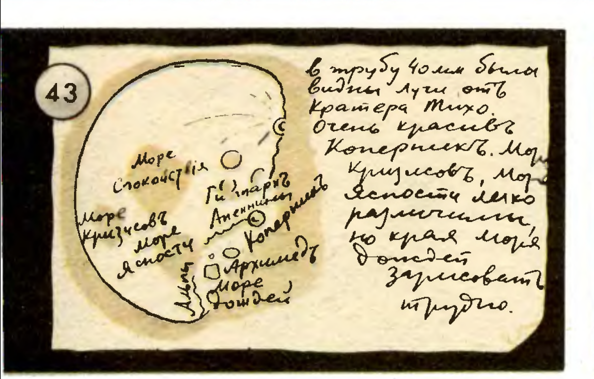
Быстро пролетел короткий зимний день. Стемнело. Одевшись потеплее и выйдя на свежий воздух, можно полюбоваться зимними звездами. Какая красота! Все небо усыпано звездами! Они горят и искрятся, как самоцветные камни. Взгляните на юг: перед вами

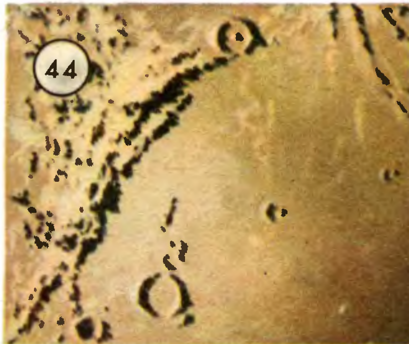
Сириус — дерзкий сапфир, синим горящий огнем,
Альдебарана рубин, алмазная цепь Ориона
И уходящий на юг призрак сребристый — Арго!
(И. А. Бунин.)


СОЗВЕЗДИЯ:
Б. МЕДВЕДИЦЫ
ВОЛОПАСА
ДЕВЫ
ГЕРКУЛЕСА
ПЕГАСА
КИТА

Как интересно находить яркие звезды и распознавать созвездия. Некоторые из созвездий изображены на рисунке 42: созвездия Большой Медведицы, Волопаса, Девы, Геркулеса, Пегаса, Кита. Линии, соединяющие звезды в том или ином созвездии, проведены на рисунке таким образом, чтобы получающаяся при этом фигура в какой-то мере соответствовала своему названию.

Так, в созвездии Большой Медведицы можно без труда увидеть очертания медведя; созвездие Волопаса изображает человека, который сидит и курит трубку; созвездие Геркулеса — это





человек, замахнувшийся дубинкой; созвездие Пегаса имеет очертания крылатого коня.

Недавно я нашел свою записную книжку 1907 года. Еще учеником VII класса Владимирской гимназии я наблюдал Луну в самодельный телескоп из очковых стекол и сделал набросок Луны (рис. 43). Вспоминаю долгие вечера, проведенные у телескопа. Интересно было наблюдать за растущей Луной, видеть все новые и новые ландшафты. По карте Луны я узнавал их названия. Вот Море Ясности и часть Моря Дождей, разделенные горными цепями Альп и Апеннин.

Красивейший пейзаж на Луне — это уже рисунок с фотографии, полученной через 40-дюймовый телескоп (рис. 44). На ней видны характерные для лунного пейзажа кольцевые горы, кратеры и цирки: Архимед с гладким дном, Эратосфен с горой в центре. Диаметр цирка Архимеда равен 80 км, а высота отдельных горных вершин Апеннин достигает 6 км.

Обратите внимание на резкие черные тени, отбрасываемые горами. Они доказывают, что на Луне нет атмосферы.

Нельзя забыть серпик Венеры, похожий на маленькую Луну, который я отчетливо видел в телескоп (рис. 45, *а*, где изображены две фазы планеты), и ясно различимый диск Юпитера с его ближайшими спутниками (рис. 45, *б*), открытыми еще Галилеем. А двойные звезды!..

Разыгравшееся воображение рисовало фантастические световые эффекты в мирах, освещенных двойными солнцами. Едва видимые невооруженным глазом туманные пятнышки рассыпались в поле зрения телескопа золотым песком звездных скоплений.





Любовь к астрономии пронес я через всю свою жизнь. Вы, мои молодые друзья, живете в счастливое время. Путешествия в космос теперь уже не мечта, а действительность. Осуществляется мечта нашего замечательного ученого Константина Эдуардовича Циолковского: «Человечество не останется вечно на Земле, но в погоне за светом и пространством сначала робко проникнет за пределы атмосферы, а затем завоюет себе все околосолнечное пространство». Пока это еще только первые шаги. Успешно осваивают ближний космос искусственные спутники Земли, пилотируемые космические корабли, орбитальные станции. Человек достиг поверхности Луны. Он произвел первую разведку планет Солнечной системы — Венеры, Марса, Юпитера. На очереди новые, еще более дерзновенные свершения. Советские люди выступают в первых рядах покорителей космоса.

ПЕРВЫЕ ШАГИ В ОСВОЕНИИ ЧЕЛОВЕКОМ КОСМОСА

Вспомним некоторые данные, показывающие этапы освоения космоса.

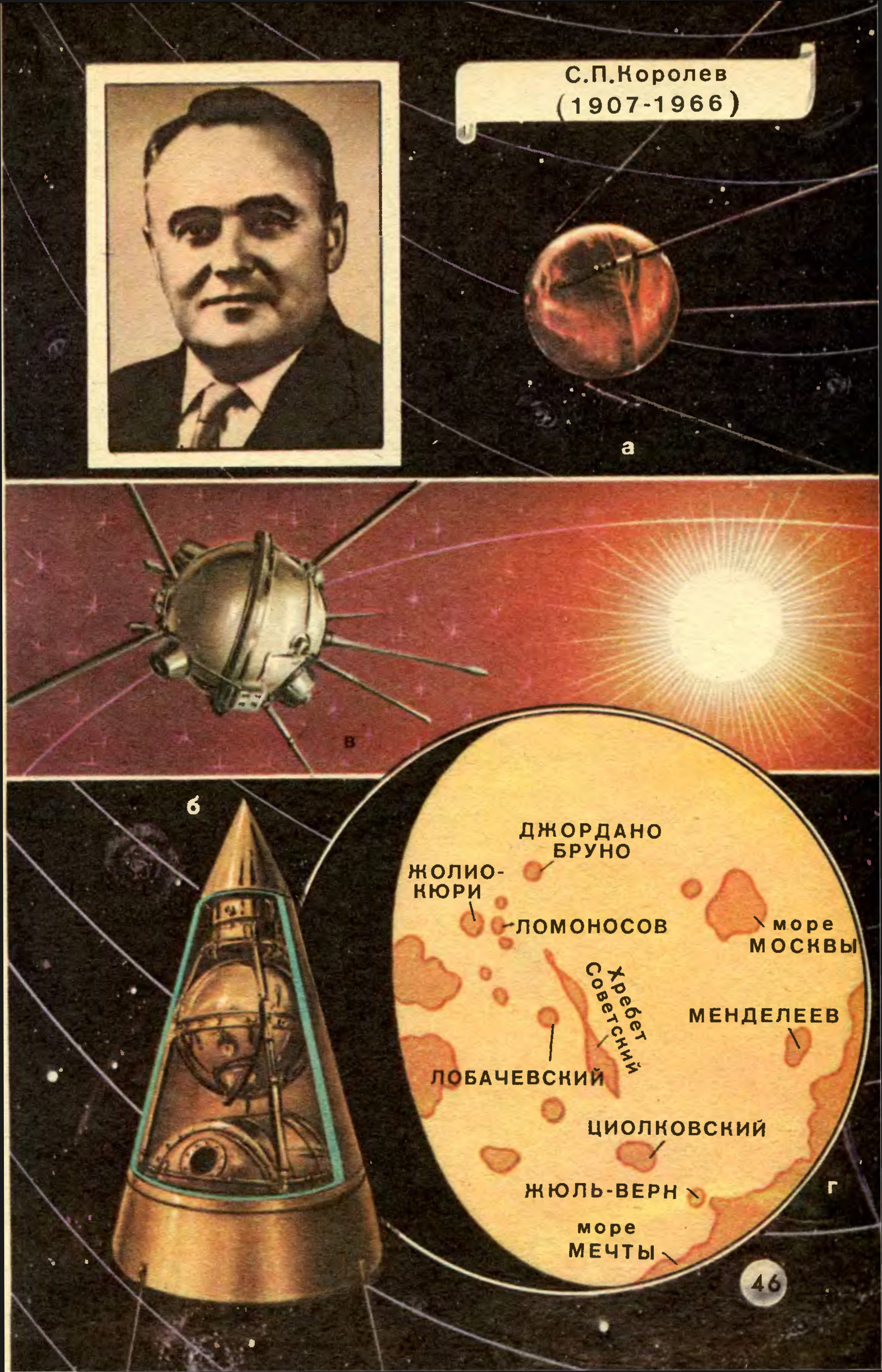
4 октября 1957 года первый советский искусственный спутник (рис. 46, *а*), шар массой 83,6 кг, достигший высоты 947 км, вызвал восторженное удивление всего мира; 92 дня летал он вокруг нашей планеты.

3 ноября 1957 года. Второй искусственный спутник (рис. 46, *б*) массой 508,3 кг с подопытным животным — собакой Лайкой — в герметически закрытой кабине летал 5 месяцев 11 дней. Высота этого спутника над Землей в апогее составляла 1671 км, в перигее — 225 км.

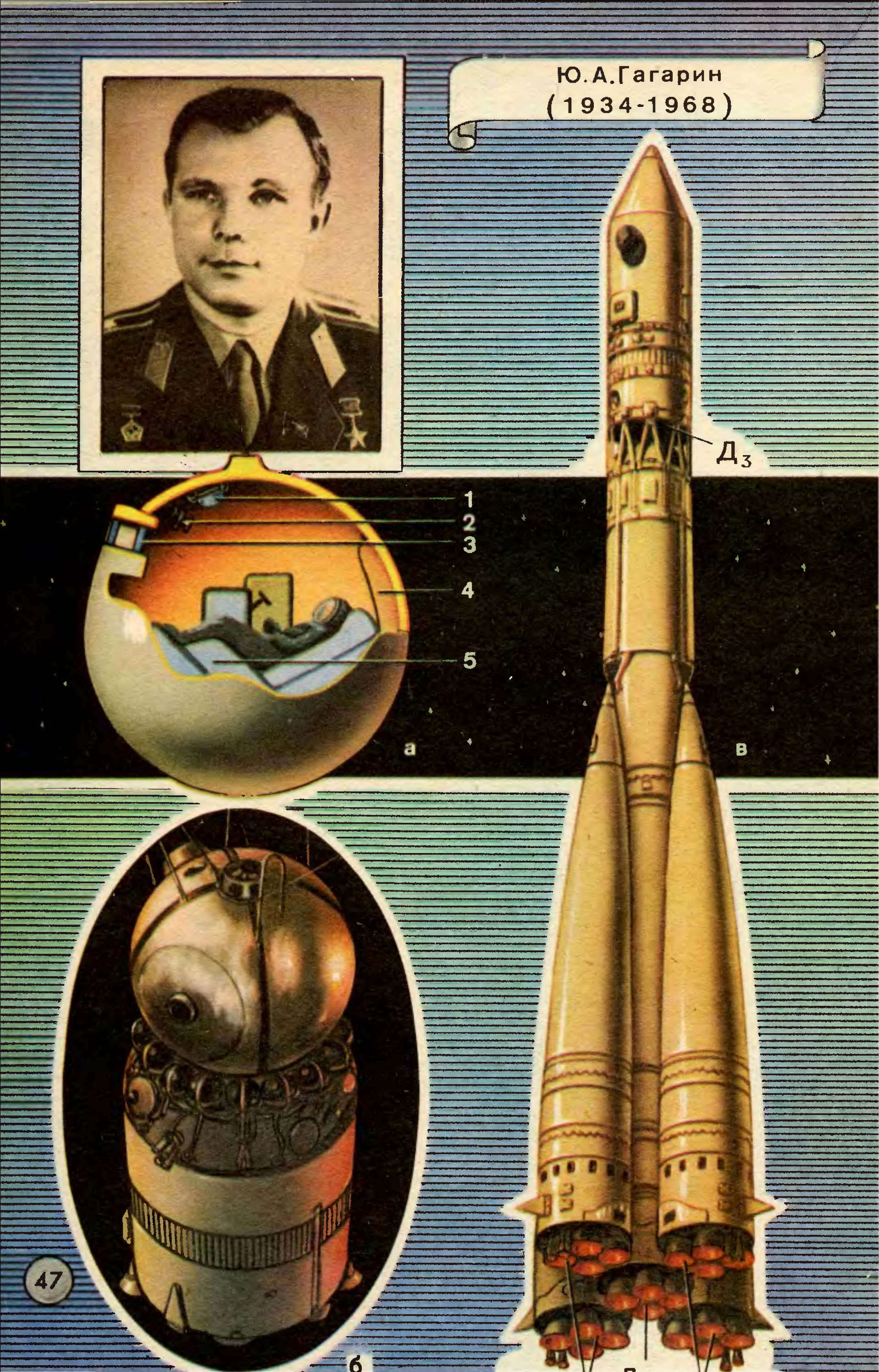
2 января 1959 года. Этот день ознаменовался запуском первой в истории человечества космической ракеты в сторону Луны с автоматической станцией на борту (рис. 46, *в*). Станция прошла около Луны, вышла на орбиту вокруг Солнца и стала первой искусственной планетой.

4 октября 1959 года стартовала третья космическая ракета с автоматической межпланетной станцией на борту. Орбита этой ракеты огибала Луну. С борта ракеты была сфотографирована поверхность Луны, невидимая с Земли. В течение 40 мин с расстояния 60—70 тыс. км производилось фотографирование лунной поверхности. По команде с Земли негативное изображение телевизионным способом было передано на Землю с расстояния 470 000 км. Советские ученые дали названия новым объектам: Море Москвы, кратер Ломоносов, кратер Циолковский, Море Мечты и др. (рис. 46, *г*).

15 мая 1960 года осуществлен запуск космического корабля-спутника массой 4540 кг. На борту корабля была установлена кабина с оборудованием для будущего полета человека. Запуск имел целью проверить работу систем, обеспечивающих безопасный полет человека на корабле-спутнике и надежность управления им. Спустя три месяца запустили второй космический корабль-спутник массой 4600 кг. На борту этого корабля находились две собаки, мыши, растения, грибковые культуры и другие объекты. После того как корабль сделал 17 оборотов вокруг Земли, была подана команда для спуска и первые путешественницы — собаки Белка и Стрелка благополучно приземлились.



С.П.Королев
(1907-1966)
а
в
б
ДЖОРДАНО
БРУНО
ЖОЛИО-
КЮРИ
ЛОМОНОСОВ
море
МОСКВЫ
Хребет
Советский
МЕНДЕЛЕЕВ
ЛОБАЧЕВСКИЙ
ЦИОЛКОВСКИЙ
ЖЮЛЬ-ВЕРН
г
море
МЕЧТЫ
46


Ю.А.Гагарин
(1934-1968)
1
2
3
4
5
а
в
Д3
б

Пока инженеры, техники, медики, биологи исследовали условия космического полета, шла подготовка к полету человека. Надо было проверить влияние на человеческий организм состояния невесомости, перегрузок при взлете, вибраций (колебаний) и т. д.

Мир напряженно ждал наступления этого дня. И вот свершилось!

12 апреля 1961 года. В 9 ч 07 мин по московскому времени космический корабль-спутник «Восток» с человеком на борту поднялся в космос и, совершив полет вокруг земного шара, вернулся на Землю. Пионером освоения космоса был Юрий Алексеевич Гагарин.

Космический корабль «Восток» показан на рисунке 47, *а*; здесь: *1* — приборная доска с глобусом, *2* — телевизионная камера, *3* — иллюминатор, *4* — входной люк, *5* — катапультируемое кресло.

На рисунке 47, *б* показан внешний вид корабля «Восток» вместе с последней ступенью ракеты-носителя. Полностью ракета-носитель показана на рисунке 47, *в*. Видны четыре сопла ($Д_1$) двигателя первой ступени ракеты, двигатель второй ступени ($Д_2$), двигатель третьей ступени ($Д_3$). Корабль «Восток» прикрыт предохранительным обтекателем.

6 августа 1961 года. В 9 ч по московскому времени на орбиту Земли был выведен новый космический корабль-спутник «Восток-2», пилотируемый летчиком-космонавтом Германом Степановичем Титовым. Советский космический корабль-спутник «Восток-2» более 17 раз облетел вокруг земного шара, преодолев расстояние свыше 700 тыс. км. Выполнив намеченную программу, летчик-космонавт успешно приземлился на территории нашей Родины.

Прошел год. И новый триумф советской науки и техники, новый подвиг летчиков-героев — беспримерный групповой полет на кораблях «Восток-3» и «Восток-4»! 71 ч «небесные братья» Андриян Григорьевич Николаев и Павел Романович Попович совершали групповой полет. Полет доказал возможность длительного пребывания человека в космосе.

А в июне 1963 года весь мир восхищался новым подвигом советских людей — групповым полетом первой в мире женщины-космонавта Валентины Владимировны Терешковой и Валерия Федоровича Быковского.

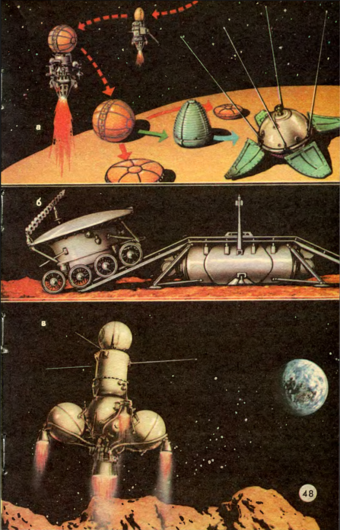
Запуски искусственных спутников разных видов и назначений следуют друг за другом. Увеличивается продолжительность, дальность, высота полета, грузоподъемность кораблей. Растет значение освоения ближнего космоса в народнохозяйственной жизни страны, в службе связи, в метеорологии, в решении важных научных проблем. Однако тема нашей беседы не позволяет нам календарно следить за развитием этих событий, она ведет нас дальше к проблемам освоения дальнего космоса, далеко за пределами земной атмосферы, к полетам в направлении Луны и планет солнечной системы. Вот наиболее примечательные вехи на этом пути.

Станция назначения Луна. После того как первые космические аппараты достигли поверхности Луны и сфотографировали ее поверхность с близкого расстояния, стал вопрос об осуществлении мягкой посадки на Луну и непосредственном исследовании ее грунта. В феврале 1966 года такая посадка была выполнена советской автоматической станцией «Луна-9» (рис. 48, *а*). Станция передала на Землю панораму лунного ландшафта в Океане Бурь и позволила сделать заключение о характере и прочности лунного грунта.

Американская программа «Аполлон» поставила целью отправку пилотируемых кораблей и в конечном счете высадку человека на Луну с возвращением на Землю. Облет Луны пилотируемым кораблем «Аполлон-8» и следующие за тем полеты кораблей «Аполлон-9» и «Аполлон-10» были проведены с целью отработки важнейших моментов управления и подготовки к мягкой посадке астронавтов на Луну. Наконец, 16 июля 1969 года с мыса Кеннеди стартовала ракета «Сатурн», унося корабль «Аполлон-11» в направлении к Луне. Через 103 ч полета 20 июля он совершил посадку в районе Моря Спокойствия, и 21 июля 1969 года первый человек Нил Армстронг ступил на поверхность Луны. Через 20 мин второй астронавт Эдвин Олдрин присоединился к нему.

Советская космонавтика избрала другой путь: усилия наших ученых были направлены на разработку совершеннейших автоматических станций.

Большое достижение советской науки и техники — автоматическая станция «Луна-16». Она совершила мягкую посадку 20 сентября 1970 года в районе Моря Изобилия. По команде


а
б
в

с Земли автоматический бур провел сверление лунного грунта и взял образцы лунной пыли. Новая команда — и станция стартует с Луны на Землю (рис. 48, *в*).

В том же 1970 году автоматическая станция «Луна-17» доставила на Луну самоходный аппарат «Луноход-1» (рис. 48, *б*), который около 11 месяцев (до октября 1971 года) по команде с Земли перемещался, «осматривал» окружающую его местность, «трогал» грунт, выполнял большой комплекс разнообразных научных исследований.

В феврале 1972 года автоматическая станция «Луна-20» по команде с Земли взяла образцы грунта в горном районе. Этот исключительной ценности груз благополучно был доставлен на Землю.

На очереди Марс. Через каждые 15 лет планета Марс оказывается на минимальном расстоянии от Земли — 56 млн. км (в 150 раз дальше Луны). Ясно, что изучение этой наиболее похожей на Землю планеты Солнечной системы сопряжено со значительными трудностями. На данном этапе развития космонавтики исследования Марса возможны только при помощи беспилотных станций и автоматических приборов.

В 1962 году был запущен советский космический зонд «Марс-1». Затем был выведен на орбиту американский аппарат «Маринер-IV». Телевизионные изображения, переданные им на Землю, показали большое сходство поверхности Марса с лунными пейзажами. Аппараты «Маринер-VI» и «Маринер-VII», запущенные в 1969 году, позволили сделать некоторые выводы о температуре, составе атмосферы планеты. В 1971 году были выведены на орбиты вокруг планеты Марс советские автоматические станции «Марс-2» и «Марс-3» и американский аппарат «Маринер-IX». От станции «Марс-2» была отделена капсула, доставившая на поверхность Марса вымпел с изображением Герба СССР. В 1973 году были запущены станции «Марс-4» и «Марс-5». В 1974 году на поверхность Марса опустился спускаемый аппарат станции «Марс-6»; через два года мягкую посадку на поверхность Марса произвели два американских аппарата «Викинг».

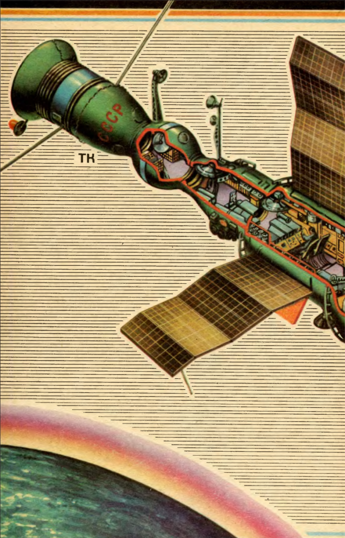
Ближайшая к Земле планета — Венера. В наивыгоднейшем для изучения положении Венера бывает на расстоянии 46 млн. км

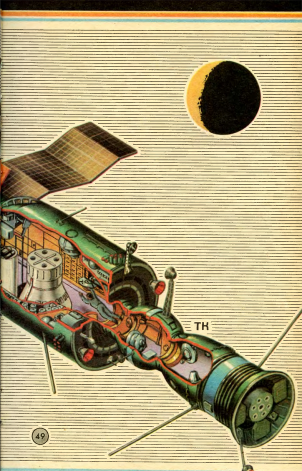
от Земли, ближе Марса; но исследования Венеры более затруднены из-за плотной облачной атмосферы, окутывающей планету и не позволяющей пока разглядеть детали ее поверхности. В 1967 году советская автоматическая станция «Венера-4» совершила плавный спуск в атмосфере планеты и впервые передала по радио данные о состоянии и физических свойствах атмосферы Венеры. Температура в том слое, до которого удалось проникнуть, оказалась около 320°С (приблизительно температура плавления свинца). Основным газом в атмосфере планеты оказался углекислый газ (97%).

Последующим автоматам «Венера-5,-6» удалось проникнуть еще глубже, до 20 км над поверхностью. 15 декабря 1970 года спускаемый аппарат станции «Венера-7» совершил (впервые в мире) мягкую посадку на поверхность планеты. В 1975 году впервые в истории освоения космоса станции «Венера-9, -10» были выведены на орбиты искусственных спутников Венеры. Спускаемые аппараты этих станций впервые передали с поверхности Венеры на Землю высококачественные панорамы районов посадки. В марте 1982 года вблизи Венеры прошли две новые искусственные планеты Солнечной системы — «Венера-13» и «Венера-14». С помощью спускаемых аппаратов этих станций ученые получили цветные панорамные изображения поверхности Венеры в районах посадки, осуществили забор грунта и его анализ.

Говоря об освоении человеком космоса, нельзя не отметить также серию советских долговременных орбитальных научных станций «Салют», выведенных на околоземную орбиту в апреле 1971 года («Салют»), апреле 1973 года («Салют-2»), июне и декабре 1974 года («Салют-3» и «Салют-4»), июне 1976 года («Салют-5»), сентябре 1977 года («Салют-6») и апреле 1982 года («Салют-7»). На рисунке 49 показаны станция «Салют-6» и состыкованные с ней два транспортных корабля *(ТК)*. Общая масса станции вместе с транспортными кораблями составляет 32,5 т, длина равна 29 м, максимальный диаметр 4,15 м.

Орбитальная станция «Салют-6» функционировала в течение 58 месяцев. За это время к станции были выполнены полеты десяти международных экипажей. Вместе с советскими космонавтами на околоземной орбите работали космонавты из Чехословакии, Польши, ГДР, Болгарии, Венгрии, Вьетнама, Кубы, Монголии, Румынии, Франции.


СССР
ТК


TK

ФИЗИКА КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Но вернемся к физике. Я коснусь лишь элементарных сведений о физике космических полетов. Даже если некоторые расчеты покажутся вам трудными, я рекомендую терпеливо разобраться в них, так как они помогут вам лучше понять физику, а ведь это главная цель данной книги.

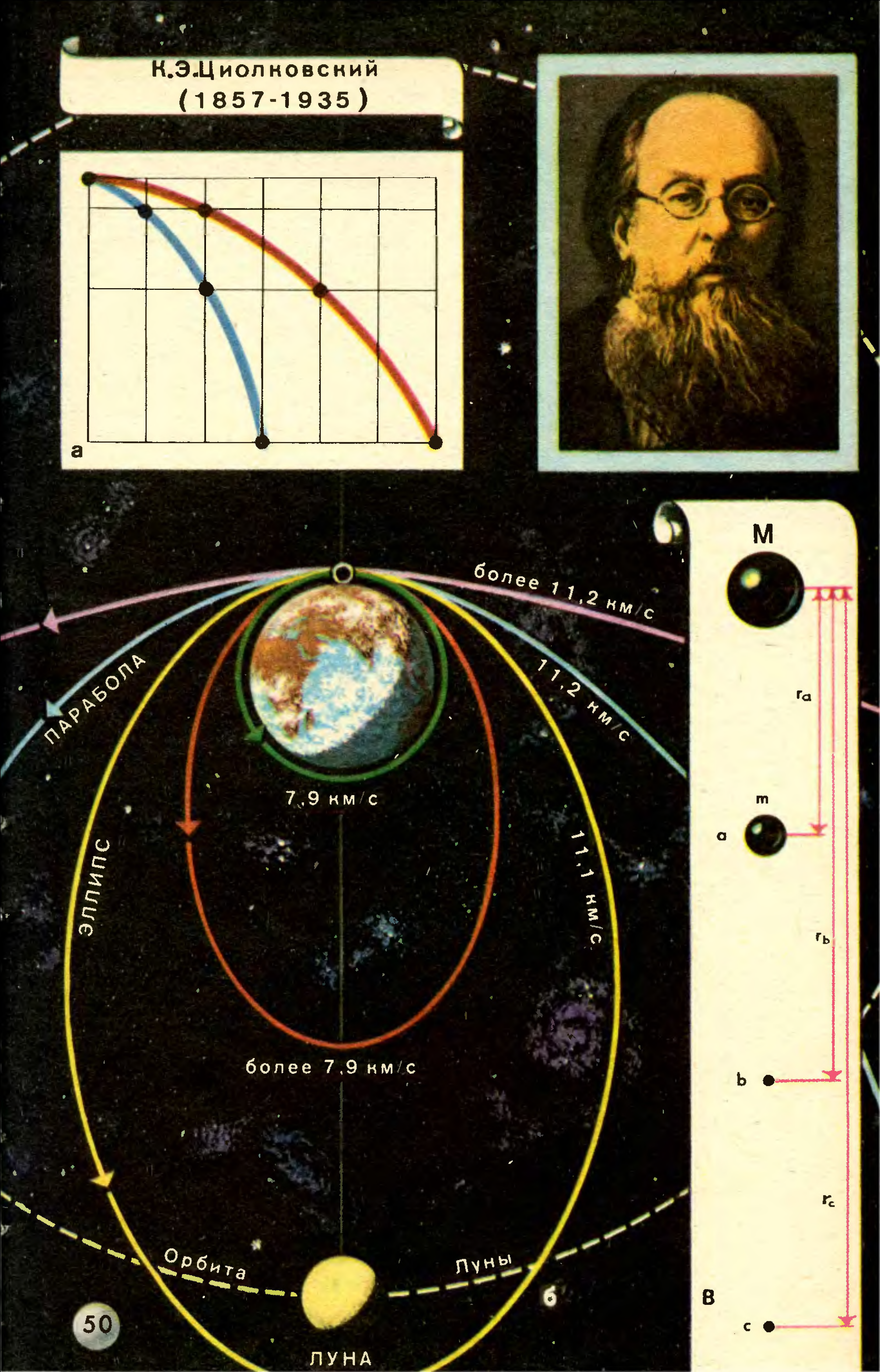
Из школьного курса вы знаете, какую траекторию имеет тело, брошенное горизонтально над поверхностью Земли. Движение такого тела, например камня, слагается из движения в горизонтальном направлении с начальной скоростью и движения вертикально вниз по законам свободного падения. Камень приближается к земле, и проходимые им в этом направлении пути за 1, 2, 3 с и т. д. относятся как квадраты этих чисел (1:4:9 и т. д.). В результате сложения этих двух движений получается траектория, называемая параболой. Можно подумать, что продолжительность полета зависит от скорости, с которой брошен камень. Однако это не так.

Один взгляд на рисунок 50, *а* покажет вам, что камень, брошенный с вдвое большей скоростью, пролетит вдвое большее расстояние; время же полета в обоих случаях будет одинаковым. При небольшой начальной скорости движения тела поверхность Земли можно принимать за горизонтальную. Для шарообразной Земли продолжительность полета, конечно, зависит от начальной скорости, и при некоторой (очень большой) скорости брошенное горизонтально тело может вообще не упасть на Землю, а станет описывать круговые траектории, оставаясь на одной и той же высоте над поверхностью Земли. Это случится, когда ускорение, сообщаемое телу силой тяжести, будет равно центростремительному ускорению, соответствующему данной скорости тела на круговой орбите: $g = a_ц = \frac{v^2}{R}$, где R — радиус орбиты. Из приведенного равенства для данного случая можно найти модуль необходимой скорости:

$$v^2 = gR; \qquad v = \sqrt{gR}.$$

Принимая R равным радиусу Земли (6400 км), получим:

$$v = \sqrt{9{,}8\frac{м}{с^2} \cdot 6\,400\,000\ м}; \quad v \approx 7{,}9\ км/с.$$



К.Э.Циолковский
(1857-1935)
а
более 11,2 км/с
ПАРАБОЛА
11,2 км/с
7,9 км/с
ЭЛЛИПС
11,1 км/с
более 7,9 км/с
Орбита
Луны
б
ЛУНА
M
m
a
r_a
r_b
b
r_c
B
c

Следовательно, тело, «брошенное» горизонтально с такой скоростью, не упадет на землю, а будет описывать круговые траектории. Эту скорость называют первой космической скоростью.

Представим себе, что из некоторой точки над поверхностью Земли запускаются по касательной к этой поверхности тела с разной начальной скоростью (рис. 50, *б*). При скорости 7,9 км/с, как мы уже видели, тело не падает на Землю, а становится ее спутником, двигаясь вокруг нее по круговой орбите. При скорости выше 7,9 км/с орбита спутника становится эллиптической. При скорости 11,2 км/с (вторая космическая скорость) тело движется по кривой, близкой к параболе; оно выходит за пределы земного притяжения и превращается в искусственную планету Солнечной системы.

Ракета обычно запускается вертикально, затем на соответствующей высоте по заданной программе поворачивается на некоторый угол к вертикали и по прекращении работы двигателя выводимый ею аппарат движется свободно по эллиптической траектории, в дальнем фокусе эллипса находится центр Земли. При достаточно большой начальной скорости (большей 7,9 км/с) космический аппарат не возвращается на Землю, а становится спутником нашей планеты. Двигаясь по эллиптической орбите, спутник находится в поле земного тяготения.

Познакомимся с элементарным выводом формулы скорости, необходимой для того, чтобы ракета перешла на бесконечную параболическую траекторию и, следовательно, улетела из поля земного тяготения в мировое пространство.

Тело, поднятое над Землей, обладает потенциальной энергией, определяемой работой, совершенной при его поднятии. На расстоянии в несколько тысяч километров от Земли сила притяжения тел к Земле заметно уменьшается.

Подсчитаем, например, работу, необходимую для перенесения тела массой m из точки a в точку c (рис. 50, *в*). Масса другого тела M.

По закону всемирного тяготения

$$F=G\frac{Mm}{r^2},$$

где G — гравитационная постоянная. Мы видим, что сила зависит от расстояния r между рассматриваемыми телами. Иначе говоря, сила F непостоянна: по мере перенесения тела массой m из

точки a в точку c сила уменьшается. Это необходимо принимать во внимание при подсчете работы.

Разделим расстояние ac на несколько участков (для простоты разделим на два участка: ab и bc) и подсчитаем работу, произведенную на каждом участке отдельно. В точке a сила притяжения равна:

$$F_a = G\frac{Mm}{r_a^2},$$

а в точке b она равна:

$$F_b = G\frac{Mm}{r_b^2}.$$

Для вычисления работы определим среднее значение силы. Но какое среднее значение определить: среднее арифметическое, равное полусумме крайних значений, или среднее геометрическое, равное корню квадратному из произведения этих значений? Точно подсчитать работу переменной силы можно только средствами высшей математики, которая подтвердила, что правильным является выбор среднего геометрического, а не среднего арифметического.

Итак, средняя сила на участке ab.

$$F_{ab} = \sqrt{\frac{GMm}{r_a^2}\cdot\frac{GMm}{r_b^2}} = G\frac{Mm}{r_a r_b},$$

а работа на этом участке

$$A_{ab} = G\frac{Mm}{r_a r_b}(r_b - r_a) = GMm\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right).$$

Таким же образом для участка bc найдем:

$$A_{bc} = GMm\left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_c}\right).$$

Сложив полученные значения работы на отдельных участках, получим полную работу на участке ac:

$$A_{ac} = GMm\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_c}\right).$$

Как велика работа для перенесения тела массой m из точки a не в точку c, а в бесконечность? Ученик, который сказал бы, что для удаления тела в бесконечность нужно совершить бесконечно большую работу, оказался бы неправ. В самом деле, если

$r_c \to \infty$, то $\frac{1}{r_c} \to 0$, поэтому работа для удаления тела из данной точки в бесконечность имеет вполне конечное значение:

$$A\infty = GMm\frac{1}{r_a}.$$

Минимальная начальная скорость, при которой тело массой m способно уйти бесконечно далеко от тела массой M, получила название скорости убегания или ускользания. Она может быть вычислена на основе закона сохранения энергии. Работа для удаления тела в бесконечность, очевидно, совершается за счет кинетической энергии $\frac{mv_у^2}{2}$, сообщенной при запуске телу массой m:

$$G\frac{Mm}{r_a} = \frac{1}{2}mv_у^2,$$

откуда скорость убегания

$$v_у^2 = \frac{2GM}{r_a}.$$

Можно показать, что

$$\frac{GM}{r_a} = gr_a,$$

где $r_a = r$ есть радиус Земли. Действительно, на поверхности Земли сила притяжения тела к центру Земли равна mg и

$$\frac{GMm}{r_a^2} = mg. \text{ Отсюда } \frac{GM}{r_a} = gr_a.$$

Подставляя это выражение в предыдущую формулу, получим для скорости убегания

$$v_у^2 = 2gr_a, \text{ или } v_у = \sqrt{2gr_a}.$$

Сравнивая скорость убегания с первой космической скоростью $v = \sqrt{gr}$, мы видим, что скорость убегания больше космической скорости в $\sqrt{2} \approx 1{,}42$ раза. Следовательно, численное значение скорости убегания будет:

$$v_у = 7{,}9 \text{ км/с} \cdot 1{,}42 \approx 11{,}2 \text{ км/с}.$$

Именно с такой или несколько большей скоростью были отправлены космические ракеты, которые вырвались из плена тяготения Земли и превратились в спутники Солнца. Конечно, v_y — это скорость при запуске. Выйдя на орбиту вокруг Солнца, ракета движется со скоростью Земли. Она имела эту скорость еще будучи на Земле.

Все вышеприведенные рассуждения относились к телу, масса которого остается неизменной. В действительности же масса ракеты, по мере того как сгорает топливо, уменьшается. Движение тела с переменной массой рассматривалось в конце XIX столетия русскими исследователями К. Э. Циолковским и И. В. Мещерским.

Приведем без доказательства формулу Циолковского для определения максимальной скорости, которую получит ракета по израсходовании топлива:

$$v_{max}=2{,}3 \cdot v_1 \lg \frac{M_0}{M_1},$$

где v_1 — скорость истечения газов, M_0 — масса ракеты в момент старта с полным запасом топлива, M_1 — масса ракеты после израсходования топлива. Отношение $\frac{M_0}{M_1}$ получило название числа Циолковского. Для читателей, знакомых с логарифмами, интересно будет подсчитать это отношение при скорости истечения газов 2,5 км/с:

$$11{,}2=2{,}3 \cdot 2{,}5 \lg \frac{M_0}{M_1}.$$

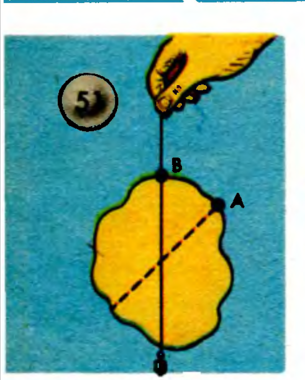
Отсюда получается, что $\frac{M_0}{M_1} = 88$, т. е. масса ракеты с топливом должна в 88 раз превосходить массу самой ракеты! Ясно, что по конструктивным соображениям построить такую ракету практически невозможно. Если увеличить вдвое скорость истечения газов, то отношение $\frac{M_0}{M_1}$ уменьшится до 10. Такую ракету построить уже можно.

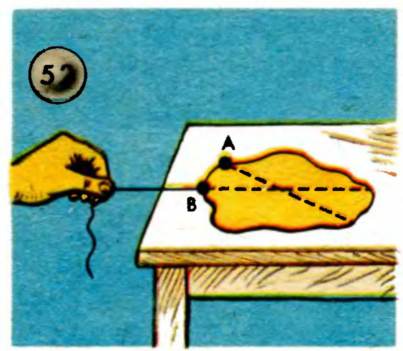
Но есть и другой путь увеличения скорости ракеты, указанный тоже Циолковским,— создание многоступенчатых ракет. По мере отработки ступени она отделяется от ракеты. Тогда вступает в действие следующая ступень.

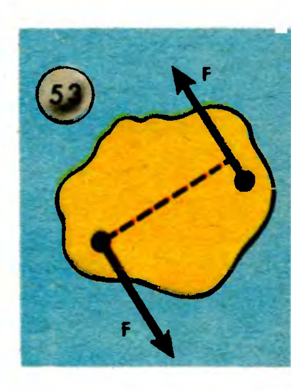
Современная космонавтика использует именно составные ракеты (напомним читателю рис. 47, *в*).

УДИВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПАРЫ СИЛ

В учебниках физики описан такой способ определения центра тяжести: пластинку произвольной формы подвешивают на нитке за какую-нибудь ее точку (рис. 51). Когда установится равновесие, через эту точку подвеса проводят на пластинке вертикаль. Центр тяжести находится, конечно, на этой линии. Потом пластинку подвешивают за другую точку. Проводят вертикальную линию, проходящую через эту точку. На пересечении двух линий и находится центр тяжести.





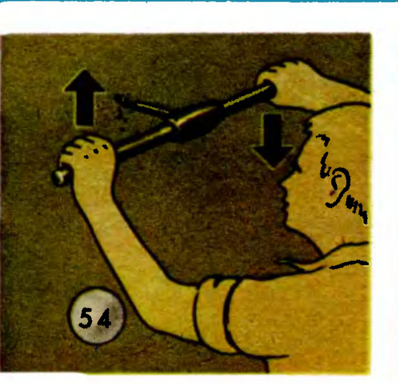


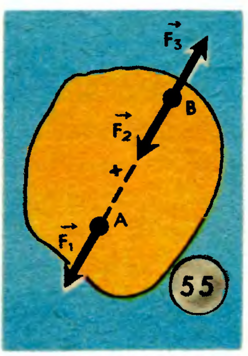
Я проводил опыты иначе. Пластинку я положил на поверхность стола и тянул за нитку так, чтобы пластинка скользила по горизонтальной плоскости. Но лучше я покажу вам это непосредственно на опыте (рис. 52). Смотрите, пластинка поворачивается, и вот направление натянутой нити проходит через центр тяжести, помеченный мной заранее на основании обычного опыта с отвесом. Прикрепим теперь нитку в другой точке и повторим опыт. Направление натянутой нити даст нам новую прямую, и в точке пересечения этих прямых находится центр тяжести пластинки.

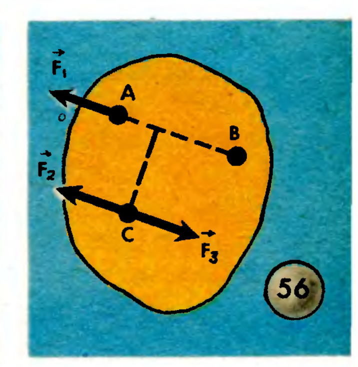
Между этими способами имеется большое сходство. Но как объяснить такой поворот пластинки в моем опыте? Постараюсь объяснить этот вопрос так, чтобы вам все было понятно. Я расскажу вам про удивительные свойства пары сил. Знание этих свойств имеет огромное значение для техники. Всюду: в машинах, станках, на заводе, на транспорте — вы видите, как враща-

ются валы, оси, шкивы. А чем вызывается вращение? Парой сил! Даже когда вам кажется, что вращение происходит под действием только одной силы, например когда вы открываете или закрываете дверь за ручку, то в действительности и тут имеется пара сил — вторая сила возникает в петлях двери.

Парой сил или просто парой в механике называют две равные по модулю, параллельные, противоположно направленные силы, приложенные к телу таким образом, чтобы они не оказались на одной прямой (рис. 53). Равнодействующей пара сил не имеет. Под действием пары сил тело вращается. И уравнове-







сить пару одной силой нельзя. Для этого потребуется другая пара сил, которая бы вращала тело в обратную сторону. Конечно, вращающее действие этой второй пары должно быть равно вращающему действию первой. А от чего зависит вращающее действие пары сил? Конечно, от модуля сил, составляющих пару сил.

Но не только от этого. Вращающее действие пары зависит и от расстояния между силами, составляющими пару. Чтобы увеличить действие пары сил, буравы, винтовые прессы и т. п. снабжают рукоятками (рис. 54), и, чем длиннее рукоятка, чем больше будет расстояние между силами, тем большим будет вращающее действие пары. Расстояние между параллельными силами пары (по перпендикулярному к ним направлению) называют плечом пары сил.

Вращающее действие пары измеряют произведением модуля силы на плечо. Такое произведение называют моментом пары.

Здесь уместно немного поговорить о слове «момент». Дело в том, что это слово в обычной разговорной речи и в механике имеет совсем разные значения. В разговорной речи «момент» означает «очень короткий промежуток времени». Так, например, говорят: «в один момент», «моментально». В механике же термин «момент» имеет иное значение; оно не связано с понятием времени. В переводе с латинского momentum означает «движущая сила», «толчок»; в английской литературе слово momentum переводится как «импульс». Однако в русской научной литературе это слово связывают не с импульсом, а с вращением. Рассматривая вращающиеся тела, используют понятия «момент силы», «момент импульса» («момент количества движения»), «момент инерции». При этом часто «момент силы» для краткости называют просто «моментом». Помня об этом, не удивляйтесь, почему при расчетах балок, осей важно находить «изгибающие моменты», при расчете валов — «крутящие моменты» и т. д.

Моменты сил вы изучали в школе и даже решали задачи на равновесие рычагов, используя правило моментов. Я уже говорил, что и при действии одной силы, если она не проходит через ось вращения тела, мы имеем в сущности пару сил. Вторая сила возникает в качестве противодействия оси телу, деформирующему ось. Ведь если бы не было оси, то тело стало бы удаляться под действием приложенной силы. Ось же удерживает его.

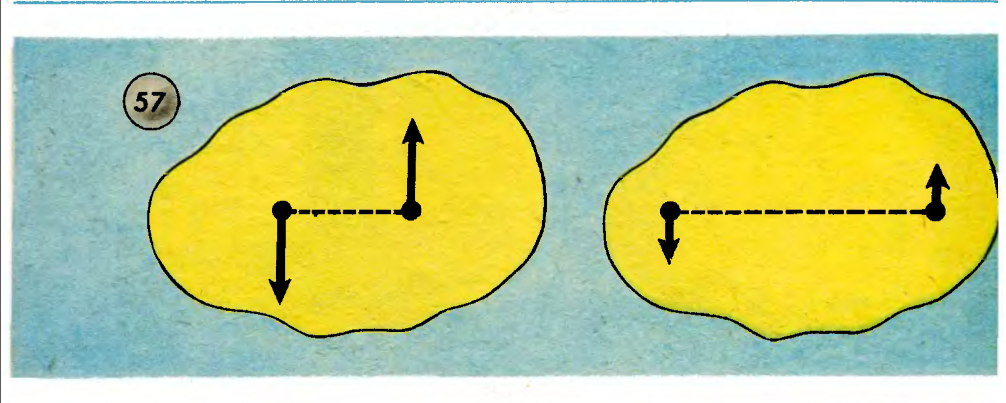
Встречающееся определение, согласно которому плечом силы называется перпендикуляр, опущенный из оси вращения на линию действия силы, полностью совпадает с определением плеча пары сил как кратчайшего расстояния между параллельными силами, составляющими пару.

Теперь я предложу вам новый вопрос: что вы знаете о переносе точки приложения силы?

Точку приложения силы можно переносить по линии действия силы. Мы хотим перенести точку приложения силы $\vec{F}_1$ из точки A в точку B (рис. 55). Приложим в точке B две противоположные силы $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$, равные по модулю силе $\vec{F}_1$. Это не окажет никакого влияния на тело: ведь силы уравновешены. Но можно считать, что уравновешены и силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$. Значит, их можно отбросить и тогда останется одна только сила $\vec{F}_2$, равная по модулю силе $\vec{F}_1$ и так же направленная, но приложенная в точке B.

А теперь я покажу вам, что случится, если мы перенесем силу $\vec{F}_1$ не в точку B на линии действия силы, а в какую-нибудь точку C вне этой линии (рис. 56). Будем рассуждать так. Приложим в точке C две силы, равные по модулю и параллельные силе $\vec{F}_1$. Можно ли теперь отбросить силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_3$, как это только что делали? Конечно нет! Это не уравновешенные силы, это пара сил, и она должна вызывать вращение тела.

Итак, если силу перенести не по линии ее действия, это не проходит безнаказанно: появляется еще так называемая «присоединенная пара». Действие этой пары тем больше, чем дальше



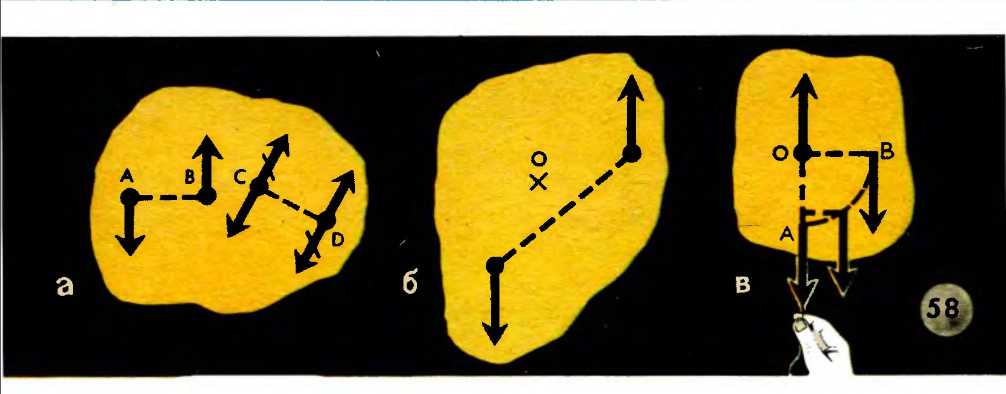
в сторону от линии AB мы выберем точку C, потому что силы-то те же, но плечо, а значит, и момент больше. В случае если точку приложения выбрать на линии действия сил, плечо обращается в нуль и никакой пары не присоединяется. Вот почему и говорят, что точку приложения силы можно переносить только по линии действия силы.

Пары, имеющие равные моменты, называются эквивалентными парами (рис. 57).

Я могу вам доказать, что в отличие от одной силы пару можно переносить в любое место плоскости, в которой она расположена, и притом совершенно безнаказанно. При этом не обязательно даже сохранять прежнее направление сил, т. е. пару можно поворачивать как угодно, лишь бы момент пары и направление вращения, ею вызываемого (по или против часовой стрелки), оставались прежними.

Вот смотрите: приложим в точках C и D ($|CD|=|AB|$) по две

противоположные силы, т. е. как бы две противоположные пары. Одна из них, отмеченная черточками (рис. 58, *а*), стремится вращать тело в одну сторону, другая — в противоположную. Следовательно, пары уравновешиваются, но можно считать уравновешенными и первоначальную пару с плечом *AB*, и противоположную ей с плечом *CD* (перечеркнутую). Тогда останется лишь одна пара с плечом *CD*, вращающая тело в ту же сторону, что и первоначальная. Значит, можно сказать, что мы пару с плеча *AB* перенесли на плечо *CD*. Разве это не удивительное свойство пары сил?



Неужели новая пара действует так же, как первоначальная? Ведь ось-то вращения тоже переместилась? Всякая пара сил, где бы она ни была расположена в той же плоскости, вращает тело вокруг оси, проходящей через центр тяжести (центр масс) тела, т. е. через точку *O* (рис. 58, *б*). Вот еще одно удивительное свойство пары сил.

Но почему же?! Какое отношение имеет к этому всему центр тяжести? Дело в том, что пара сил не имеет равнодействующей. Следовательно, в этом случае не удастся свести движение тела к движению центра тяжести. Поскольку на центр тяжести не действует никакая сила, то он должен оставаться в покое, быть неподвижным. Других неподвижных точек у тела быть не может, так как две неподвижные точки, не лежащие на оси вращения, не позволили бы телу вращаться.

Значит, где же проходит ось вращения (ведь ось вращения неподвижна)? Только через центр тяжести и нигде больше! Если

направление приложенной силы не проходит через центр тяжести, то мы можем ее перенести, как я объяснял, в центр тяжести, но тогда появится присоединенная пара. Тело начнет поворачиваться, как вы и видели на опыте (см. рис. 52). При этом плечо пары и ее момент будут все уменьшаться (рис. 58, *в*), пока направление тянущей нити не станет проходить через центр тяжести. Тогда вращение прекратится и тело будет двигаться поступательно.

Вот и все, что я хотел рассказать вам об удивительных свойствах пары сил. То, что вы узнали, имеет большое значение в технике. Для плавного хода машин необходимо, чтобы вращающиеся части были хорошо уравновешены (балансированы), т. е. чтобы ось вращения проходила через центр масс вала, шкива, якоря электрического генератора или двигателя, иначе установка будет вибрировать и может разрушиться.

ИНТЕРЕСНЫЕ И ПОЛЕЗНЫЕ ПАРАЛЛЕЛИ

Расскажу вам о вращательном движении.

На первый взгляд может даже показаться, что вращательное движение нарушает законы механики.

В чем же нарушение и каких законов? Ну, скажем, закон инерции. Ведь всякое тело, если на него не действуют неуравновешенные силы, должно или покоиться, или двигаться равномерно и прямолинейно. Но вот я даю боковой толчок этому глобусу, и он начинает вращаться. Если бы не трение, он, вероятно, вращался бы вечно, как вращается земной шар, никем не подталкиваемый. Как же быть с первым законом Ньютона? Или есть два закона инерции: один для прямолинейного, а другой для вращательного движения?

Не торопитесь, мы сейчас выясним, в чем тут дело, и убедимся, что беспокоиться за законы Ньютона не приходится.

Вращательное движение отличается от поступательного. Однако есть в них и много общего, и весьма полезно сопоставить эти два вида движения. Много путаницы в головах учащихся происходит оттого, что в курсе физики средней школы не строго разграничивают механику материальной точки и механику материального тела. Скажите, вы помните, что называется поступательным движением?

— Конечно. Движение тела, при котором все его точки движутся одинаково.

— А как вы это понимаете?

— Я понимаю это так, что все точки тела в каждый момент времени имеют одинаковую по модулю и направлению скорость. Все точки описывают одинаковые траектории.

— Вот именно. Поэтому и можно рассматривать поступательное движение тела как движение одной точки, вернее, заменить движение тела движением его центра масс. Если на такое тело (материальную точку) не действуют другие тела, т. е. если оно не испытывает на себе действия неуравновешенных сил, то оно покоится или движется равномерно и прямолинейно.

Вращение тела характеризуют угловой скоростью, показывающей, на какой угол оно повернется за единицу времени. В технике угловую скорость часто выражают числом оборотов в минуту. Если угловая скорость постоянна, то мы говорим, что тело вращается равномерно. Если угловая скорость равномерно возрастает, то вращение называют равноускоренным. Сходство законов поступательного и вращательного движений поразительное. Только буквенные обозначения различны, а формулы получаются совершенно одинаковые. Вот первая параллель:

Поступательное движение	Вращательное движение
Буквенные обозначения	
Скорость v	Угловая скорость ω
Путь s	Угловое перемещение φ
Время t	Время t
Ускорение a	Угловое ускорение α
Формулы равномерного движения	
$s=vt$	$\varphi=\omega t$
равноускоренного движения (без начальной скорости)	
$v=at$	$\omega=\alpha t$
$s=\frac{at^2}{2}$	$\varphi=\frac{\alpha t^2}{2}$

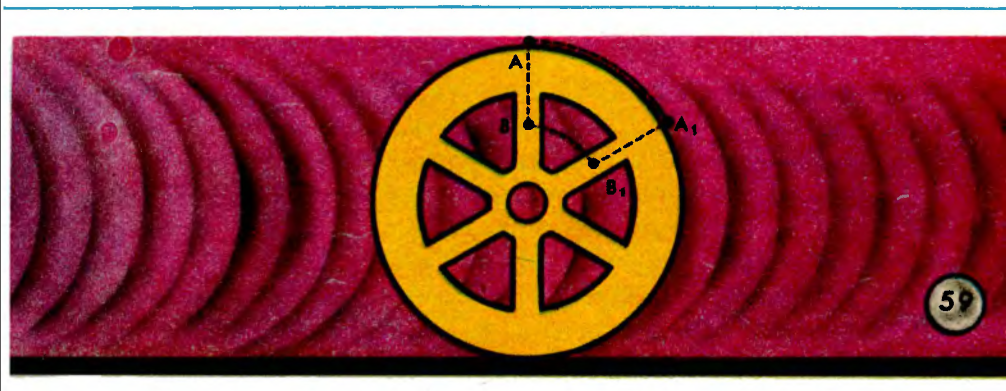
Все задачи по кинематике как вращательного, так и поступательного движения решаются по этим формулам аналогично.

— Это все понятно. Но как же быть с законом Ньютона?

— Не торопитесь, слушайте дальше. Рассмотрим движение одной материальной точки. Если хотите, вы можете представить себе ее как маленький тяжелый шарик. Можно сделать так, чтобы он двигался по окружности? (Катим маленький шарик от шарикоподшипника по столу.)

— Конечно, нет, он катится по прямой.

Можно, конечно, вести шарик по окружности, поддерживая его все время пальцами. Но стоит только убрать руку, как он будет продолжать движение по прямой линии.



— Итак, материальная точка может двигаться по окружности только под действием силы. Я вел шарик рукой, можно было бы привязать к нему веревочку или катить его внутри желобка. Как только прекратится действие силы, шарик начнет двигаться прямолинейно и равномерно.

В твердом теле не одна точка, а множество. Как вы думаете, они (точки) свободны или связаны?

— На них действуют силы сцепления.

— Верно. Они-то и удерживают точки на круговой орбите. Не будь этих сил, материальные точки вращающегося тела разлетелись бы, как грязь слетает с вращающихся колес.

Есть еще одно сходство между поступательным и вращательным движением. При поступательном движении все точки тела движутся в данный момент времени с одинаковой линейной скоростью v. Если тело вращается, то все точки вращающегося тела движутся с одинаковой угловой скоростью ω.

Например, угловые скорости всех точек вращающейся спицы AB (рис. 59) одинаковы, а линейные различны.

На уроке физики вам говорили, что равномерное движение точки по окружности есть в то же время движение с ускорением. Это ускорение называется центростремительным ускорением. Оно не характеризует изменение скорости по модулю, а характеризует только изменение направления скорости. Тут нелегко разобраться.

Я бы отстаивал определение равномерного вращательного движения только по угловой скорости. Тогда те параллельные формулы, о которых я говорил, будут всем понятны. Да и в технике, когда речь идет о равномерном вращении маховика или ротора электрического генератора или двигателя, подразумевают постоянной угловую скорость. Постоянное число оборотов якоря генератора обеспечивает постоянное напряжение в сети; постоянное число оборотов маховика обеспечивает плавный ход машины и экономичность ее работы. Это постоянство стараются поддержать, регулируя работу машины.

Теперь проведем параллель динамическую. По второму закону Ньютона ускорение, получаемое телом, вычисляется из формулы $a=\frac{F}{m}$. При вращении тела изменение угловой скорости будет зависеть от силы. Теперь скажите, все ли равно, где приложить силу при завинчивании, скажем, гайки: к концу рукоятки гаечного ключа или к самой гайке?

Вращающее действие силы, или момент силы,— вот что здесь важно, вот что является аналогом силы поступательного движения. Параллель найдена: силе в поступательном движении соответствует момент силы во вращательном движении. Так продолжим нашу сравнительную табличку.

Поступательное движение	Вращательное движение
Сила F Работа $A=Fs$ Мощность $N=\frac{Fs}{t}=Fv$	Момент силы $M=Fl$, где l — плечо силы Работа $A=M\varphi$ Мощность $N=\frac{M\varphi}{t}=M\omega$

— Я еще не написал формулы второго закона Ньютона, потому что об этом законе следует сказать подробнее. В формулу закона Ньютона входит масса m. Что она характеризует?

— Инертность тела.

— Правильно. Теперь подумайте, характеризует ли масса инертность вращающегося тела?

— Инертность вращающегося тела характеризуется не массой, а особой величиной, называемой моментом инерции, в которую входит как составная часть и масса. Момент инерции обозначается буквой I. Он зависит от массы тела и распределения этой массы, т. е. от формы тела. Тела различной формы имеют различные моменты инерции.

Простейший случай — движение материальной точки по окружности. Момент инерции такой точки равен произведению массы точки на квадрат расстояния ее от оси вращения, т. е. $I=mr^2$. Если массу отнести от оси вращения на расстояние, вдвое большее, то инертность этой массы, или устойчивость вращательного движения, будет больше в четыре раза. Вот почему маховые колеса делают большими. Но слишком увеличивать радиус нельзя. С увеличением радиуса колеса увеличивается линейная скорость точек обода колеса: $v=\omega r$. Учитывая, что центростремительное ускорение есть $a=\frac{v^2}{r}$, получаем отсюда: $a=\omega^2 r$. Это означает, что с увеличением радиуса колеса растет центростремительное ускорение точек его обода. Создающая это ускорение сила сцепления молекул может оказаться недостаточной для удержания их на круговом пути, и тогда колесо разрушится.

Каждое тело можно представить состоящим из множества точек. Для вычисления момента инерции тела надо суммировать моменты инерции отдельных точек. Эта задача вам пока не под силу. Скажу только, что для диска и сплошного цилиндра, вращающихся вокруг собственной оси, $I=\frac{1}{2}mr^2$. В телах такой формы разные точки тела находятся на разных расстояниях от оси вращения, начиная от 0 и до r. Момент инерции тонкого круглого кольца (есть сходство с ободом маховика) $I=mr^2$. Обо всем этом вы узнаете из курса теоретической механики, когда будете учиться в техникуме или институте. Сейчас же вы должны понять, что во вращательном движении роль массы играет момент инерции и закон динамики вращательного движения, аналогичный второму закону Ньютона, примет вид: $M=I\alpha$.

Теперь мы можем закончить сравнительную таблицу, включив в нее формулы для основного уравнения динамики, импульса и кинетической энергии:

Поступательное движение	Вращательное движение
Основное уравнение динамики $F = ma$ Импульс $p = mv$ Кинетическая энергия $E_k = \frac{mv^2}{2}$	Основное уравнение динамики $M = I\alpha$ Импульс $p = I\omega$ Кинетическая энергия $E_k = \frac{I\omega^2}{2}$

МАЯТНИК — ЭТО НЕ ТОЛЬКО В ЧАСАХ

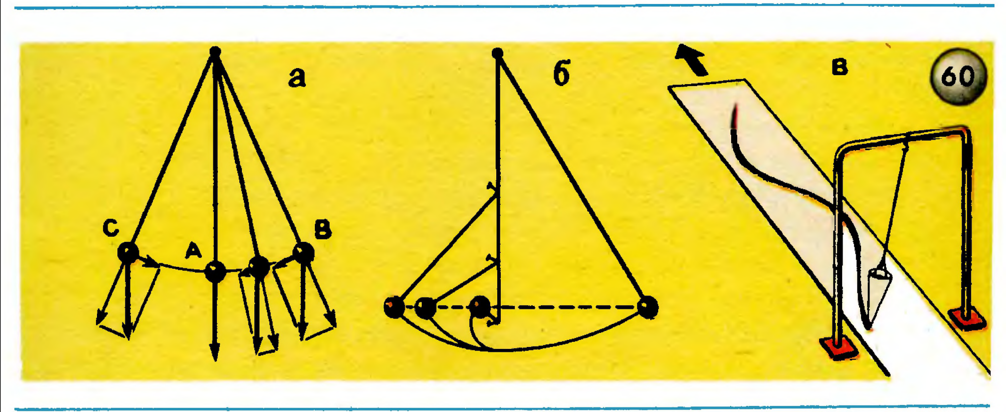
Всюду в нашей жизни мы встречаемся с колебательными движениями, начиная от качаний маятника, колебаний рессор и сотрясений кузова автомобиля или вагона поезда до страшных, разрушительных колебаний коры нашей планеты. Фабричные трубы и высокие здания колеблются под действием ветра, подобно полотну ножовки, зажатому одним концом в тисках. Правда, такие колебания не так уж велики. Амплитуда колебаний вершины Эйфелевой башни в Париже (высотой 300 м) при сильном ветре около 50 см.

Колебания! Наш взгляд падает на маятник стенных часов. Неугомонно спешит он то в одну, то в другую сторону, своими ударами как бы разбивая поток времени на точно размеренные отрезки. «Раз-два, раз-два»,— невольно повторяем мы в такт его тиканию. Качание влево и обратно вправо, в исходное положение, составляет полное колебание маятника, а время одного полного колебания называют периодом колебания. Число колебаний тела в секунду называется частотой колебания.

Изучение колебаний начинается с изучения движения простого нитяного маятника, который вы легко можете изготовить, подвесив небольшой металлический шарик на нитку. Уменьшая мысленно размеры шарика до материальной точки, а нити приписывая идеальные свойства: невесомость, абсолютную гибкость и отсутствие трения, мы придем к теоретическому, так называемому «математическому маятнику».

Период колебания маятника выражается формулой $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, где l — длина маятника, g — ускорение свободного падения. Ни масса маятника, ни угол отклонения от положения равновесия в эту формулу не входят, так как период колебания маятника от них не зависит.

Как объяснить движения маятника, которые повторяются с одним и тем же периодом и могли бы продолжаться вечно, если бы маятник не встречал сопротивления движению в виде трения и не совершал бы работы, преодолевая это сопротивление? Оче-



видно, движение маятника происходит за счет сообщенной ему энергии. Когда мы отводим маятник от вертикального положения, то сообщаем ему некоторый запас потенциальной энергии. Когда маятник опускается из точки *В* в точку *А* (рис. 60, *а*), потенциальная энергия, запасенная при подъеме, переходит в кинетическую. Скорость маятника увеличивается, но не равномерно, потому что сила, сообщающая ускорение, уменьшается. В точке *А* скорость маятника будет наибольшей, поэтому маятник не может остановиться в этой точке, вследствие инерции он будет продолжать движение. Поскольку шарик привязан к нити, то подниматься в точку *С* он будет по дуге окружности. Высота подъема равна высоте опускания маятника. Это подметил еще Галилей в своем опыте, известном под названием «маятник Галилея» (рис. 60, *б*). Вбив по одной вертикальной линии, проходящей через положение равновесия маятника, гвоздики на различной высоте и пуская маятник, он подметил, что, обогнув гвоз-

дик, маятник поднимался вправо на такую же высоту, с какой был опущен.

Колебания маятника — пример на закон сохранения энергии.

Колебания маятника — это гармонические колебания.

Что такое гармонические колебания, попробуем выяснить на опыте.

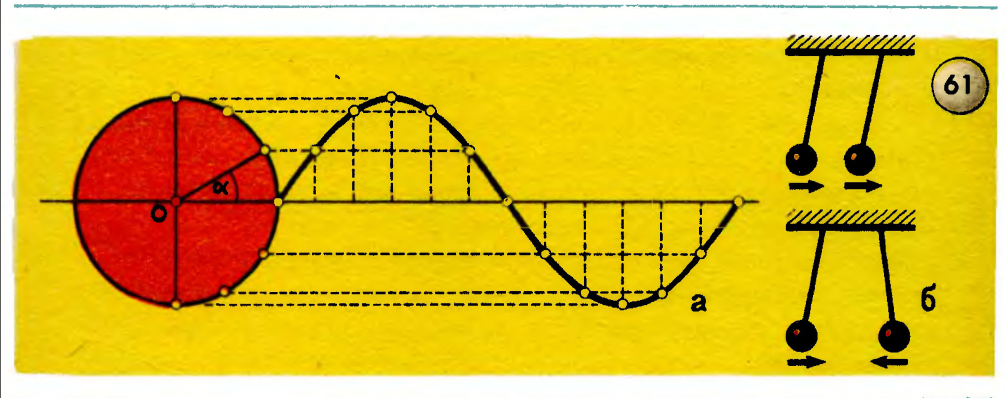
Подвесим воронку, склеенную из плотной бумаги и наполненную сухим, просеянным через частое сито песком, как показано на рисунке 60, *в*. Под воронку положим длинную полосу картона, выкрашенного в белый цвет. Пустив воронку качаться, как маятник, будем двигать картонную полоску равномерно в направлении, перпендикулярном к плоскости качания маятника. Высыпающийся из воронки песок «запишет» на картоне волнообразную линию, называемую синусоидой. Колебания, происходящие по закону синуса, называются синусоидальными или гармоническими. Происхождение слова «гармонический» уходит в даль веков, в историю Древней Греции, к учению Пифагора, искавшего начало всех начал в числах и учившего, что порядок и красота Вселенной основаны на числах.

Рассмотрев внимательно синусоиду, образованную на картоне, вы заметите, что песок ложился неодинаковой толщиной: чем ближе к вершине или впадине синусоиды, тем гуще насыпан песок. Это свидетельствует о том, что скорость маятника в этих точках была меньше, обращаясь в нуль в самых верхних и самых нижних точках кривой, т. е. в точках, где маятник менял свое движение на обратное. Среднее положение маятник проходил с максимальной, накопленной во время падения скоростью и потому оставлял тонкий след.

Большое значение при изучении колебательных процессов имеет понятие «фаза».

Фаза — слово греческое, в переводе на русский язык означает «проявление». В физике этим словом характеризуют стадию (ступень) развития периодического процесса, например: начало его, максимум развития, минимум и т. д. Однако такого определения фазы, как физической величины, недостаточно. Надо знать, как ее можно измерить. Для этого рассмотрим прием графического построения синусоиды (рис. 61, *а*). Из точки *О* как из центра опишем окружность и на продолжении горизонтального диаметра проведем горизонтальную линию (ось синусоиды). Пред-

ставим, что по этой окружности равномерно вращается точка. Проекции радиуса-вектора, проходящего через последовательные положения точки, дадут нам значения соответствующих ординат точки синусоиды, а угол поворота радиуса-вектора при этом, считая от горизонтальной оси против часовой стрелки, будет характеризовать положение точки на окружности, т. е. характеризовать стадию развития процесса. Этот угол называется фазовым углом или просто фазой. На рисунке 61, *б* показаны два маятника: вверху в одинаковых фазах, внизу в противоположных фазах колебания.



Маятник или другая колебательная система, приведенная в движение и предоставленная самой себе, совершает, как говорят, свободные колебания.

Предоставленный самому себе, маятник будет продолжать качаться, но размахи его, амплитуды колебания, будут становиться все меньше и меньше, колебания будут затухать. Движение колеблющегося маятника переменное: то ускоренное, то замедленное, но это движение и не равномерно переменное. Как видно из чертежа, сила, сообщающая маятнику ускорение, уменьшается по мере уменьшения угла отклонения маятника от вертикального положения. В пружинном маятнике сила упругости растянутой или сжатой пружины непостоянна и сообщаемые маятнику ускорения тоже непостоянны. Такая зависимость ускоряющей силы от расстояния колеблющейся точки до положения равновесия является основным признаком гармонического движения. Гармоническими колебаниями называют поэтому ко-

лебания, вызванные силой, возрастающей пропорционально отклонению от положения равновесия. Колебания маятника можно считать гармоническими лишь при небольших углах отклонения маятника от положения равновесия, не больших 10°.

В практике часто бывает необходимо поддержать колебания, не давать им затухать. Ясно, что для этого придется подводить к колеблющемуся телу энергию извне. В тех случаях, когда система приводится в колебательное движение действием какой-нибудь внешней, изменяющейся по модулю силы, мы будем иметь дело не со свободными, а с вынужденными колебаниями. Такие колебания, навязанные системе извне, будут происходить с частотой изменения силы, вызывающей эти колебания. Например, колебания фундамента двигателя являются вынужденными и происходят с частотой колебаний двигателя.

Непериодические изменения внешней силы, конечно, отражаются на частоте колебаний. Так, записанная на граммофонной пластинке речь или музыка повторяется мембраной патефона, приходящей в колебания с меняющейся частотой, а значит, воспроизводящей звуки различной высоты и громкости. Эти колебания вызваны толчками, которые получает иголка, двигаясь по дорожке звукозаписи. Если у вас есть граммофонная пластинка, то вы можете воспроизвести записанную на пластинке музыку или речь, приставив к равномерно вращающейся пластинке открытку или листок плотной бумаги.

В том случае, когда частота изменения внешней силы совпадает с собственной частотой колебательной системы, происходит увеличение амплитуды колебаний этой системы. Так, периодически подталкивая качели, в такт их собственным колебаниям, мы можем очень сильно раскачать их. Такое явление носит название резонанса и имеет огромное значение в технике. Настраивая радиоприемник на определенную частоту, вы приводите его в резонанс с радиовещательной станцией.

Опасные последствия, которые могут быть вызваны резонансом (разрушение мостов, потолочных перекрытий, фундаментов), описаны в любом учебнике физики.

Остановимся еще на одном виде колебаний — автоколебаниях. Так называются колебания, происходящие с собственной частотой колеблющейся системы, но под действием не переменной, а постоянной силы. Когда скрипач равномерно ведет смычок по струне скрипки, струна совершает собственные автоколебания,

дающие звук определенного тона. Когда анкер часов своими палетами (зубьями) соприкасается с зубьями ходового колеса, они подталкивают их в направлении движения. В результате маятник колеблется с собственной частотой, зависящей только от его длины.

СТАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Почему для строительных сооружений применяют балки и другие детали из фасонной стали: уголки, двутавры и др.? Почему их делают именно такой формы? Ведь не для красоты же?

Чтобы понять это, нам придется познакомиться с основами науки о прочности. Только мой рассказ будет довольно длинным.

— Наука о прочности сооружений и конструкций называется сопротивлением материалов.

Материалы, из которых делают детали машин и строительных конструкций, подвергаются действию внешних сил, или нагрузок, которые могут изменить форму (деформировать) или разрушить их и тем испортить машину или сооружение. Внешним силам оказывают сопротивление внутренние силы связи между частицами, из которых состоит тело. Инженер и техник-строитель должны определить значения действующих сил и сил сопротивления, чтобы знать, надежны ли эти детали. Для оценки этой надежности принято находить силу, приходящуюся на единицу площади сечения детали, так называемое напряжение в материале.

Если площадь поперечного сечения стального троса подъемного крана равна 2 $см^2$ и трос удерживает груз массой 1000 кг, то напряжение в нем будет равно:

$$\frac{10\,000 \text{ Н}}{0{,}0002 \text{ м}^2} = 5 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

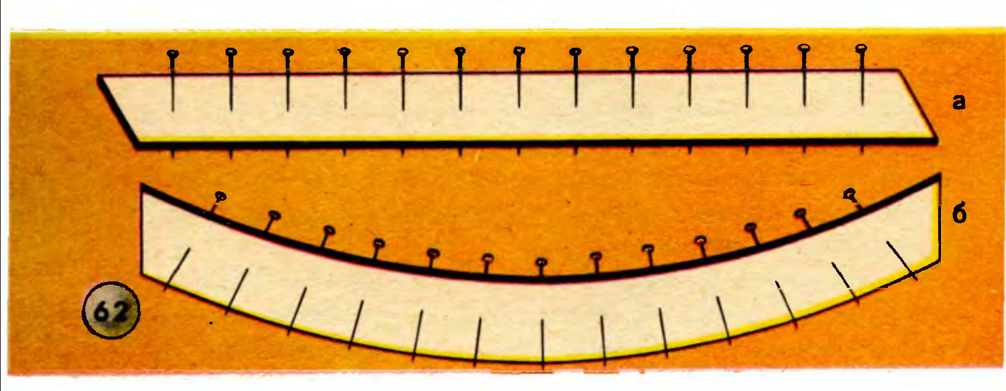
(мы приняли здесь $g = 10$ м/$с^2$).

По специальной таблице, помещенной в справочнике, надо найти предел прочности для данного сорта стали. Допустим, что этот предел равен $5 \cdot 10^8$ Па. Следовательно, такой трос удовле-

творяет технике безопасности; можно сказать, что в данном случае трос имеет десятикратный запас прочности.

Большую заботу строителя составляет выбор запаса прочности, или коэффициента безопасности. Этот коэффициент выбирается в зависимости от нагрузки (спокойная или ударная) и назначения сооружения.

Допускаемая нагрузка зависит и от вида деформации. Есть материалы, которые хорошо выдерживают большие нагрузки при сжатии и очень небольшие — при растяжении. Например, предел прочности чугуна на растяжение равен $1,5 \cdot 10^8$Па, а на



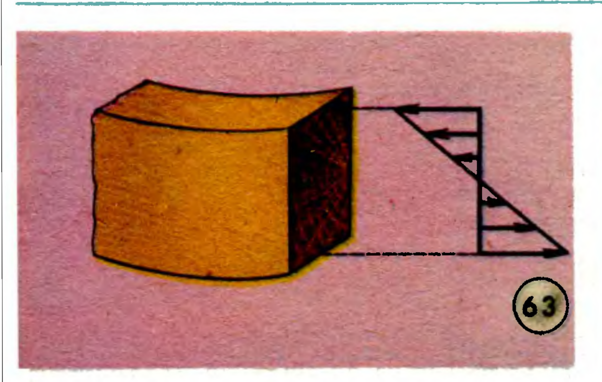
сжатие $6 \cdot 10^8$Па. Следовательно, чугун является неплохим материалом для изготовления колонн, но из него не следует изготовлять стержни, которые будут работать на растяжение. Кирпичная кладка не выносит растяжения, но может служить хорошей опорой, фундаментом, так как хорошо противостоит действию сжимающих нагрузок.

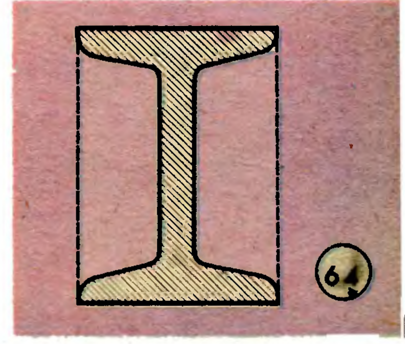
Учесть все условия работы сооружения — весьма сложная задача. Но чтобы не затягивать ответ на интересующий вас вопрос, перейдем к виду деформации, очень часто встречающемуся на практике,— деформации изгиба.

Я беру картонную полоску и сгибаю ее. Предварительно я воткнул в нее несколько булавок по одной линии на равных расстояниях одну от другой. Концы булавок на верхней, вогнутой стороне сблизились, а на нижней, выпуклой разошлись (рис. 62).

Но не только концы булавок, но и частицы картона в верхнем слое сблизились — верхний слой сжат, а в нижнем слое

разошлись — он растянут. Это можно сказать, взглянув на чертеж изогнутого бруса,— длина наружной дуги больше, чем внутренней. Вот как принято изображать распределение напряжений в изогнутом брусе (рис. 63). Теперь, я думаю, вам понятно, что средняя часть бруса не испытывает такого напряжения, как его края (верхний и нижний). Так зачем же тратить напрасно материал? Если его удалить, то и получится форма профиля так называемой двутавровой балки (рис. 64). Название происходит от греческой буквы «тау» (τ). Из двух таких букв, сложенных своими концами, и получился профиль двутавра.


63


64

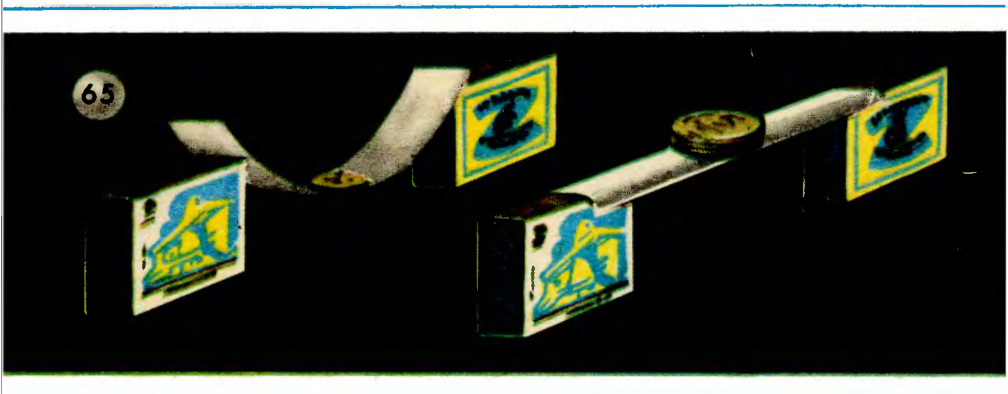
Балки изготовляют определенных номеров. Номер балки показывает высоту поперечного сечения балки в сантиметрах. Например, балка № 10 имеет высоту 10 см, № 24 — 24 см. Другие размеры (толщина и ширина полки и перекладины) приводятся в технических справочниках. В справочниках же указывается площадь поперечного сечения для каждого номера балки и две очень важные характеристики балки: момент инерции и момент сопротивления.

При расчете конструкции с балками важно знать кривизну изогнутой балки. Кривизна балки зависит от моментов приложенных сил («изгибающих» моментов) и от жесткости балки, которая в свою очередь определяется профилем сечения и материалом балки. Вы сейчас уясните это из очень простого опыта.

Положим длинную бумажную полоску на две опоры, она прогнется под действием даже собственного веса. Но если изменить

ее форму, то она окажет большее сопротивление изгибу, приобретет жесткость (рис. 65).

Каждый техник и инженер должен уметь определять изгибающий момент силы, действующей на балку в данных условиях. В простейшем случае, когда нагрузка F сосредоточена в середине балки, а сама балка свободно лежит на двух опорах, максимальный изгибающий момент в середине балки определить нетрудно. Для этого надо знать силы, приложенные к балке. Кроме нагрузки F, на балку действуют силы реакции опор — это результат сжатия опор под давлением балки. Понятно, что по модулю


65

каждая из этих сил равна половине нагрузки. Изгибающий момент равен произведению силы на плечо, т. е. в данном случае

$$M=\frac{F}{2}\cdot\frac{l}{2},$$

где l — длина балки, $l/2$ — расстояние от точки приложения действующей силы до точки опоры.

Чем ближе точка приложения силы к концу балки, тем плечо и момент этой силы меньше. На самих опорах они обращаются в нуль.

Расчет напряжения в различных сечениях балки ведется по формуле

$$\text{напряжение}=\frac{\text{изгибающий момент}}{\text{момент сопротивления}}.$$

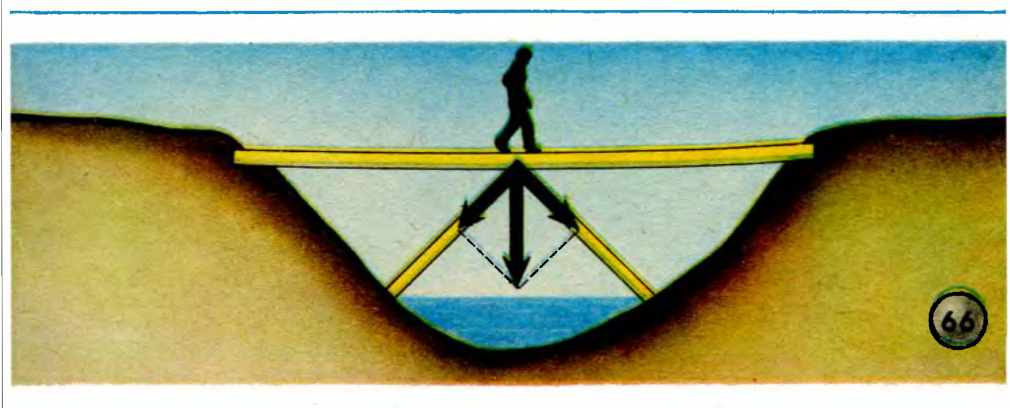
Момент сопротивления — величина, связанная с моментом инерции, как я уже говорил, указывается в справочниках. Вы-

численное по этой формуле напряжение сравнивают с допускаемым.

Так решается вопрос о прочности балки и о возможности ее использования.

— А зачем мосты делают в виде красивых, но сложных переплетов?

— Эти переплеты на техническом языке называются фермами. Инженеры рассчитывают каждое звено такой фермы на растяжение и сжатие. Но едва ли стоит рассматривать сегодня этот трудный вопрос.



Приведу пример из практики. Через ручей перекинута доска; она сильно прогибается под тяжестью переходящего ручей человека. Для увеличения жесткости доски прибили к ней два подкоса из двух досок; в результате она перестала прогибаться (рис. 66).

В данном случае силу тяжести человека можно разложить по направлению этих подкосов по правилу параллелограмма. Составляющие силы тяжести будут направлены к берегу, т. е. будут действовать на опоры. Вот вам пример простейшей фермы.

А как выбрать угол между составляющими?

Величина угла имеет большое значение. В этом вы можете убедиться, построив несколько параллелограммов. Чем больше угол между подкосами, тем больше получатся составляющие силы (вес человека остается постоянным) и тем сильнее подкосы будут вдавливаться в берега. В строительстве сооружений каждое дело начинается с расчета.

ПИСЬМО ЛОМОНОСОВА

5 июля 1748 года Михаил Васильевич Ломоносов писал:

«Знаменитейшему и ученнейшему мужу Леонарду Эйлеру, заслуженнейшему королевскому профессору и члену славной Берлинской Академии наук, а также почетному члену императорской Петербургской Академии наук и Лондонского Королевского общества, нижайший привет шлет

Михайло Ломоносов...»

Выдержки из этого знаменитого письма приводят во многих книгах по физике и химии, когда хотят сказать о роли нашего великого соотечественника в установлении основных законов природы — законов сохранения материи и движения. Но прежде чем проследить за ходом мысли автора письма, постараемся выяснить, при каких обстоятельствах оно было написано, каково было тогда состояние науки на Западе и в России. Все это поможет нам лучше понять величие Ломоносова и значение идей, изложенных в его письме.

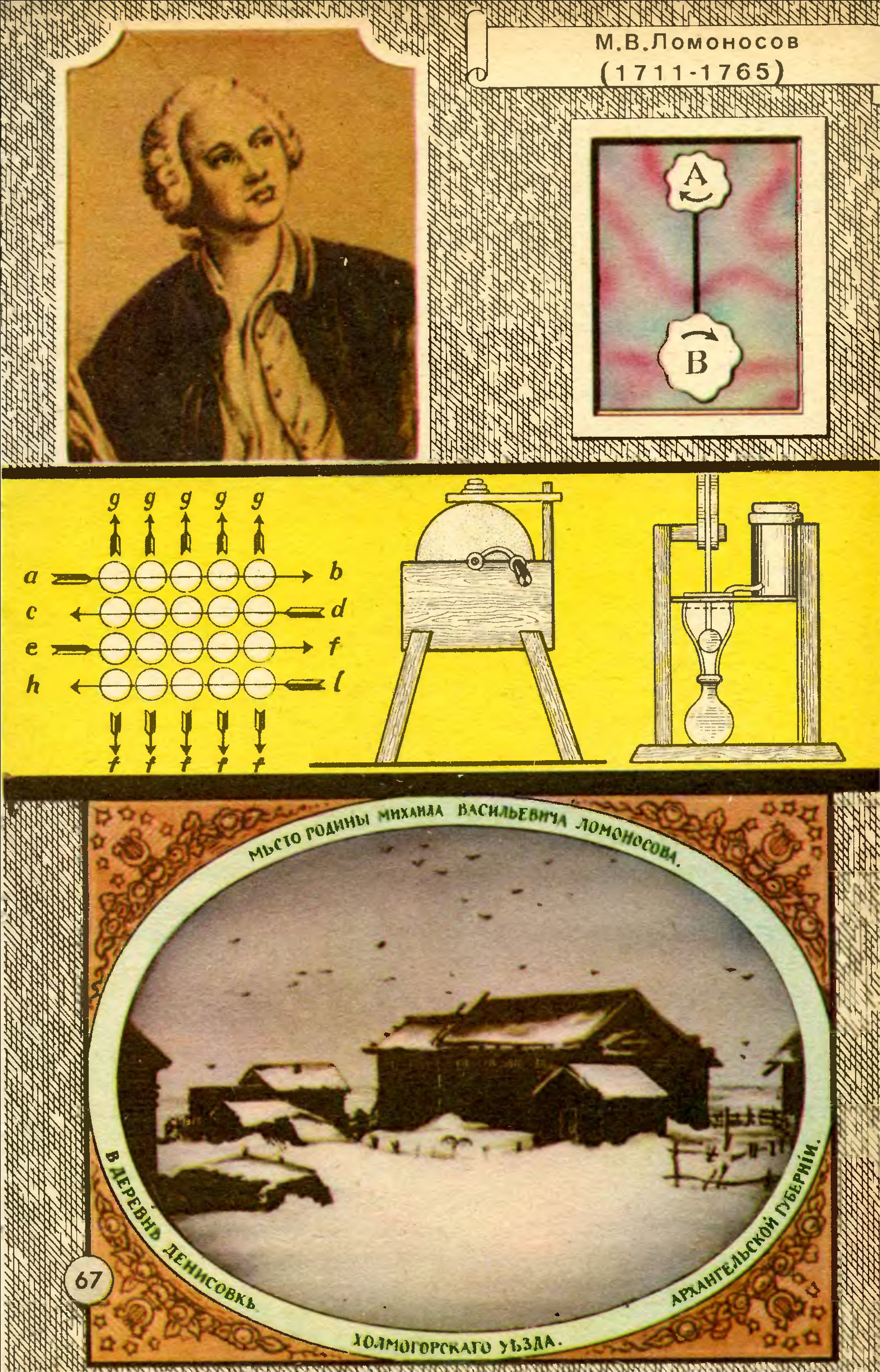
Великий русский ученый М. В. Ломоносов родился в 1711 году в деревне Денисовке Архангельской губернии (рис. 67). Время жизни Ломоносова совпадает с тем периодом русской истории, когда, по образному выражению Пушкина, царь Петр

...уздой железной
Россию поднял на дыбы.

В результате преобразовательной деятельности Петра I рушился старинный уклад отсталой феодальной России и, несмотря на сопротивление реакционных сил, страна поворачивалась навстречу просвещению.

В Англии в это время Ньютон писал свои великие «Начала», в Германии Лейбниц создавал дифференциальное исчисление.

По указу Петра в 1725 году открылась первая Российская Академия наук. Ее открытию предшествовала переписка царя с Лейбницем и другими знаменитыми учеными, по рекомендации которых в качестве первых академиков были приглашены Бернулли (гидродинамик), Эйлер (математик и механик), Рихман (физик) и др. С их помощью царь Петр надеялся подготовить кадры отечественных специалистов.


М.В.Ломоносов
(1711-1765)
A
B
g g g g g
a b
c d
e f
h l
f f f f f
МѢСТО РОДИНЫ МИХАИЛА ВАСИЛЬЕВИЧА ЛОМОНОСОВА.
В ДЕРЕВНѢ ДЕНИСОВКѢ
ХОЛМОГОРСКАГО УѢЗДА.
АРХАНГЕЛЬСКОЙ ГУБЕРНІИ.
67

М. В. Ломоносов в 1741 году был назначен адъюнктом, а с 1745 года его избрали действительным членом академии. Но обстановка в академии к этому времени уже изменилась. В академию проникли иностранные проходимцы, в результате создались крайне тяжелые условия работы, побудившие многих ученых покинуть Россию. Уехали братья Бернулли, Эйлер и другие ученые. Но Эйлер не прекратил письменной связи с академией, и в особенности с Ломоносовым.

В пространном письме Эйлеру, написанном по-латыни, как это было принято между учеными того времени, Ломоносов касается основных физических понятий. «Прежде всего считаю необходимым изложить то, с чем мы встречаемся в самом начале естественных наук...» — пишет он и далее излагает свои взгляды на строение вещества, понятия массы, плотности. Глубокие мысли Ломоносова о процессах горения и окисления, об условиях взаимодействия тел легли в основу ряда его последующих работ в области химии, физики, минералогии, металлургии и других наук. Ломоносов отрицал взаимодействие тел на расстоянии без участия промежуточной материальной среды (на современном языке мы бы сказали «поля»).

Но, конечно, было бы неправильно утверждать, что в XVIII веке Ломоносов мог подняться до физических теорий XX века. Отмечая его передовые взгляды, мы только хотим подчеркнуть, что Ломоносов далеко опередил своих современников.

Излагая свои представления о природе теплоты, Ломоносов делает в письме то знаменитое замечание, в котором выражена его мысль о сохранении материи и движения: «...все перемены, в натуре случающиеся, происходят так, что если к чему-либо нечто прибавилось, то это отнимется у чего-то другого. Так, сколько материи прибавляется к какому-либо телу, столько же теряется у другого». И дальше: «Так как это всеобщий закон природы, то он распространяется и на правила движения: тело, которое своим толчком возбуждает другое к движению, столько же теряет своего движения, сколько сообщает другому, им двинутому».

То же положение и примерно в тех же словах выразил Декарт в своих «Началах философии»: «Когда одно тело сталкивается с другим, оно может сообщить ему лишь столько движения, сколько само одновременно потеряет, и отнять у него

лишь столько, насколько оно увеличит свое собственное движение».

Однако взгляды Декарта переплетаются с религиозными воззрениями. «Бог,— писал Декарт,— есть первая причина движения». М. В. Ломоносову, который к рассмотрению явлений природы подходил материалистически, это положение Декарта казалось неприемлемым. «Легко быть философом, выучась произносить наизусть три слова: «бог так сотворил», и сие давая в ответ вместо всех причин»,— писал Михаил Васильевич.

Приведенный отрывок из письма Ломоносова составляет содержание «Закона Ломоносова». Так назвал его академик С. И. Вавилов в статье, напечатанной 5 января 1949 года в газете «Правда».

Современная наука знает ряд законов сохранения: закон сохранения импульса (количества движения), закон сохранения энергии, закон сохранения заряда и др. В XVIII веке понятие материи отождествляли с понятием вещества, а под движением понимали только механическое движение. Приоритет в открытии закона сохранения вещества при химических реакциях, бесспорно, принадлежит Ломоносову, он доказан Ломоносовым экспериментально. Закон сохранения количества движения был высказан, как мы только что сказали, еще Декартом. Современная физика различает физические формы движения и устанавливает их способность превращаться друг в друга. Закон сохранения при этих превращениях называется законом сохранения и превращения энергии.

Отдельные высказывания о законах сохранения можно встретить и в более далекие времена. Так, например, римский поэт Лукреций в философской поэме «О природе вещей» написал:

За основу тут мы берем положенье такое:
Из ничего не творится ничто.

Что же тогда понимать под «законом Ломоносова»? Академик С. И. Вавилов отвечает на этот вопрос так: «Значение и особенность начала, провозглашенного Ломоносовым, состояли не только в том, что этим законом утверждались законы неуничтожимости и сохранения материи и движения в отдельности. Некоторые из этих истин издавна, еще в древности, угадывались передовыми умами... В отличие от своих предшественников Ломоносов говорит о любых «переменах в натуре случающихся»,

об их общем сохранении, и только в качестве примеров перечисляет отдельно взятые сохранение материи, сохранение времени, сохранение силы». Таким образом, в современной формулировке закон Ломоносова может быть передан так: материя и присущее ей движение не уничтожимы. В такой самой общей формулировке закон Ломоносова включает в себя все остальные законы сохранения как частные случаи.

Все рассуждения Ломоносова всегда были плодом глубокого исследования, а не результатом мимолетных впечатлений и настроений. Это видно из того, что основные идеи, которые заключались в приведенных нами отрывках из письма, Ломоносов позволил себе опубликовать лишь после многолетнего обдумывания и экспериментальной проверки. В своей диссертации «Рассуждение о твердости и жидкости тел», написанной в 1760 году, он слово в слово повторяет цитированное место письма к Эйлеру: «Все перемены в натуре случающиеся...»

О том, как чужда была Ломоносову всякая поспешность в выводах, свидетельствует опять его историческое письмо к Эйлеру: «Вот, знаменитейший муж, что я обдумываю уже несколько лет и что не позволяет мне привести в единую систему и опубликовать результаты моих исследований, относящихся к причинам частных качеств. Но не сомневаюсь, что Ваше острое суждение освободит меня из этого лабиринта. Примите, несравненный муж, эти мои размышления со свойственной Вам непредубежденностью и не оставляйте меня Вашим благосклонным расположением. Будьте здоровы.

Петербург, 5 июля, 1748 г.»

ЧТО ТАКОЕ РАБОТА

— Что вам задано на завтра по физике, Игорь? — спросил Иван Иванович, подходя к столу, за которым сидел его сын, перелистывая учебник физики.

— Повторить о работе. Очень мало, всего три параграфа и две задачи. Это очень просто. Я уже приготовил уроки.

— Мало — это верно, но просто ли? Вот скажи, пожалуйста, что называется работой?

— Что называется работой? М-м-м, пожалуй, прямого ответа на этот вопрос в книге нет. Приводятся примеры работы, гово-

рится, что понятие о работе в механике не совпадает с представлением о работе в обыденной жизни. В механике понятие работы относится только к тем случаям, когда какое-либо тело перемещается под действием приложенной к нему силы... Но что называется работой?! Постой, учитель задал, например, такой вопрос: «По гладкому горизонтальному льду катится стальной шарик. Допустим, что сопротивление движению (трение) отсутствует. Совершается ли при этом механическая работа?» Может быть, механическая работа представляет собой преодоление сопротивления на пути движения тела. Работой называют произведение силы на путь, пройденный по направлению силы:

$$A = Fs.$$

— Так, преодоление сопротивления, говоришь? Скажи, если тело массой m, падая в пустоте, например в трубке Ньютона, проходит путь h, то совершает ли работу сила тяжести?

— Конечно, $A = mgh$.

— Ну, а что же здесь преодолевается?

Лицо Игоря выражает крайнее изумление. Как же так? Есть и перемещение, и сила, приложенная к телу, т. е. соблюдены оба условия, необходимые для того, чтобы можно было говорить о работе, а в чем же тут состоит работа? Что преодолевается? Нельзя же сказать, что преодолевается инерция тела. Учитель не один раз разъяснял, что сохранение состояния покоя или равномерного и прямолинейного движения по инерции никак нельзя понимать как сопротивление тела изменению его состояния. В чем же тут дело?

— Что же произошло с телом? Как изменилось его состояние? Как движется свободно падающее тело?

— Равноускоренно. Тело под действием силы тяжести стало двигаться, и притом ускоренно. Теперь оно обладает кинетической энергией! Результат работы: тело получило энергию.

— Неужели ты думаешь, что тело не имело энергии в верхней точке?

— Имело, потенциальную. Теперь ее стало меньше, но появилась кинетическая энергия.

— А вот другой пример. Когда я поднимаю вот эту книгу и ставлю ее на верхнюю полку, я совершаю работу против силы тяжести. Книга поднята. У нее добавилась потенциальная энер-

гия по сравнению с прежним ее положением. Откуда она взялась?

Игорь (радостно). Знаю, это твоя энергия! Ты отдал часть энергии книге. Работа, стало быть, есть передача энергии от одного тела к другому. Поднимая книгу, ты совершал работу, т. е. передавал энергию.

— Хорошо, думай дальше. Я снимаю книгу с полки и опять кладу ее на стол. Вернулась ли ко мне прежняя энергия?

Лицо Игоря снова вытягивается, он морщит лоб, силясь разрешить задачу.

— Потенциальная энергия книги, снятой с полки, стала меньше. Куда же делась кинетическая энергия, какую она приобрела бы, падая с той же высоты? Эта энергия, конечно, досталась мне, но не вернула меня в прежнее состояние. Удерживая книгу от падения, я должен был напрягать мускулы, произошли физиологические изменения, которые нельзя учесть по законам механики.

— Работа по преодолению силы трения, силы сопротивления среды...

— Опять преодоление? Нет, мне решительно не нравится такое определение работы. Гораздо лучше, если ты всегда будешь рассматривать работу как передачу энергии от одного тела к другому, причем почти всегда будет происходить превращение энергии из одного вида в другой.

На что расходуется энергия лошади при перевозке дров на санях? Учти, что ответ: «Энергия пошла на преодоление трения» — я не зачту.

Игорь пытается ответить, но ему не хватает нужных слов.

Отец. Принеси мне, пожалуйста, из соседней комнаты со стола книгу «Избранные сочинения» Горького. Я прочту тебе замечательное описание работы грузчиков на пристани.

Игорь нашел требуемую книгу и передал ее отцу.

— Спасибо. Пока я найду нужную страницу, скажи, в чем заключалась сейчас твоя работа, когда ты нес книгу. Не о работе по преодолению силы трения тут речь, ты же не шаркал ногами по полу, да и не так велико сопротивление среды. Может быть, ты поднимал груз?

Нет, положительно не везло в этот вечер Игорю. Что ни вопрос, то загадка. И на этот вопрос он не может самостоятельно ответить.

— Ну, так и быть, я тебе помогу ответить на эти вопросы. Когда ты идешь с книгой или без книги, то при каждом шаге центр тяжести твоего тела поднимается и опускается. По существу при ходьбе ты совершаешь работу, связанную с многократным подниманием центра тяжести. А теперь слушай, как написал Горький в повести «Мои университеты»: «Мне хорошо памятен день, когда я впервые почувствовал героическую поэзию труда.

Под Казанью села на камень, проломив днище, большая баржа с персидским товаром; был сентябрь, дул верховой ветер, по серой реке сердито прыгали волны, ветер бешено срывал их гребни, кропил реку холодным дождем. Артель, человек полсотни, угрюмо расположилась на палубе пустой баржи, кутаясь рогожами и брезентом...

К полуночи доплыли до переката, причалили пустую баржу борт о борт к сидевшей на камнях; артельный староста, ядовитый старичишка, рябой хитрец и сквернослов, с глазами и носом коршуна, сорвав с лысого черепа мокрый картуз, крикнул высоким, бабьим голосом:

— Молись, ребята!

В темноте, на палубе баржи, грузчики сбились в черную кучу и заворчали, как медведи, а староста, кончив молиться раньше всех, завизжал:

— Фонарей! Ну, молодчики, покажи работу! Честно, детки! С богом — начинай!

И тяжелые, мокрые люди начали «показывать работу». Они, точно в бой, бросились на палубу и в трюмы затонувшей баржи — с гиком, ревом, с прибаутками. Вокруг меня с легкостью пуховых подушек летали мешки риса, тюки изюма, кож, каракуля, бегали коренастые фигуры, ободряя друг друга воем, свистом, крепкой руганью. Трудно было поверить, что так весело, легко и споро работали те самые люди, которые только что жаловались на жизнь, на дождь. Дождь стал гуще, холоднее, ветер усилился, рвал рубахи, закидывал подолы на головы, обнажая животы. В мокрой тьме при слабом свете шести фонарей метались черные люди, глухо топая ногами о палубы барж. Работали так, как будто ожидали удовольствия швырять с рук на руки четырехпудовые мешки, бегом носиться с тюками на спине...

Я тоже хватал мешки, бросал, снова бежал и хватал, и каза-

лось мне, что и я сам, и все вокруг завертелось в бурной пляске, что эти люди могут так страшно и весело работать без устали, не щадя себя — месяца, года, что они могут, ухватясь за колокольни и минареты города, стащить его с места, куда захотят.

Я жил эту ночь в радости, не испытанной мною, душу озаряло желание прожить всю жизнь в этом полубезумном восторге делания.

И до двух часов дня, пока не перегрузили весь товар, полуголые люди работали без отдыха под проливным дождем и резким ветром, заставив меня благоговейно понять, какими могучими силами богата человеческая земля».

Иван Иванович захлопнул книгу.

— Так-то, брат! Поэзия ручного труда! Горький, конечно, великий писатель, певец человека и его творческих сил. Но давай посмотрим на всю эту историю глазами физика. Давай подсчитаем работу, проделанную 50 грузчиками за 14 ч. Мощность человека в среднем равна одной десятой лошадиной силы[1], хотя в минуту душевного подъема, в экстазе, она может быть и больше одной лошадиной силы, но ненадолго. В данном случае, при длительной работе, я думаю, мы все же не сможем оценить ее свыше 0,15 л. с.

Зная мощность и время работы, мы можем вычислить проделанную работу:

$$A = Nt = 0{,}15 \text{ л. с.} \cdot 50 \cdot 14 \cdot \text{ч} \cdot 736 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кВт}}{\text{л.с.}} = 76{,}3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Описанный Горьким случай относится к 1886 году.

Разгрузка такой баржи современными механизмами заняла бы не больше 3 ч, а главное, избавила бы людей от изнурительно тяжелой работы. Портальные краны, транспортеры, нории (вертикальные транспортеры), плавучие краны, судовые стрелы, пневматические перегрузчики совершенно преобразили работу крупных морских портов и речных пристаней.

А рекорды строительной техники! Я читал, что на постройке пирамиды Хеопса трудились 10 000 рабов в течение 20 лет.

---

[1] Мощность здесь измерена в особых единицах — лошадиных силах (л. с.). 1 л. с. = 736 Вт.

В наши дни такую пирамиду можно было бы соорудить за 9 месяцев при участии всего 500 рабочих.

Вам, конечно, рассказывали в школе, что землеройные машины с вместимостью ковша 20 м^3 заменяют 10 тысяч рабочих.

Разумеется, в основе успехов техники лежит наука, и в первую очередь физика. Вот почему ты должен особенно ценить уроки физики, читать дополнительную литературу.

Пока же предлагаю тебе несколько вопросов по теме, заданной на дом. Эти вопросы ты можешь предложить завтра товарищам.

1. Человек, держащий в руках груз (корзину с продуктами), не совершает механической работы. Совершает ли работу этот человек, если он поднимается в лифте?

2. Тело покоится на тележке, движущейся по инерции. Совершается ли при этом работа?

3. При занятии гимнастикой человек поднимает и опускает гантели. Совершает ли он работу?

4. Если человек стоит с грузом на плечах, он не совершает никакой работы, так как ничего не движет. Почему же устает стоящий человек, если у него на плечах какой-нибудь груз?

5. Первый раз футбольный мяч ударился о штангу ворот и остановился. Второй раз мяч был схвачен вратарем, двигавшимся навстречу мячу с такой же по модулю скоростью, что и мяч. Будет ли разница в работах, произведенных мячом в первый и во второй раз? (Ответ: во втором случае работа будет в 4 раза больше.)

НЕОСУЩЕСТВИМАЯ МЕЧТА

Среди детских игрушек можно встретить забавный прибор под названием «птичка Хоттабыча» (рис. 68). Птичка периодически наклоняется, опускает клюв в воду и поднимает его. Кое-кто, увидев эту игрушку впервые, может воскликнуть: «Вечный двигатель!» Но... не будем торопиться. Разберем секрет птички. Ее голова и клюв покрыты ватой. Если эту вату слегка увлажнить, то при испарении воды голова птички будет охлаждаться. В нижней ампуле прибора налит эфир или другая легко испа-

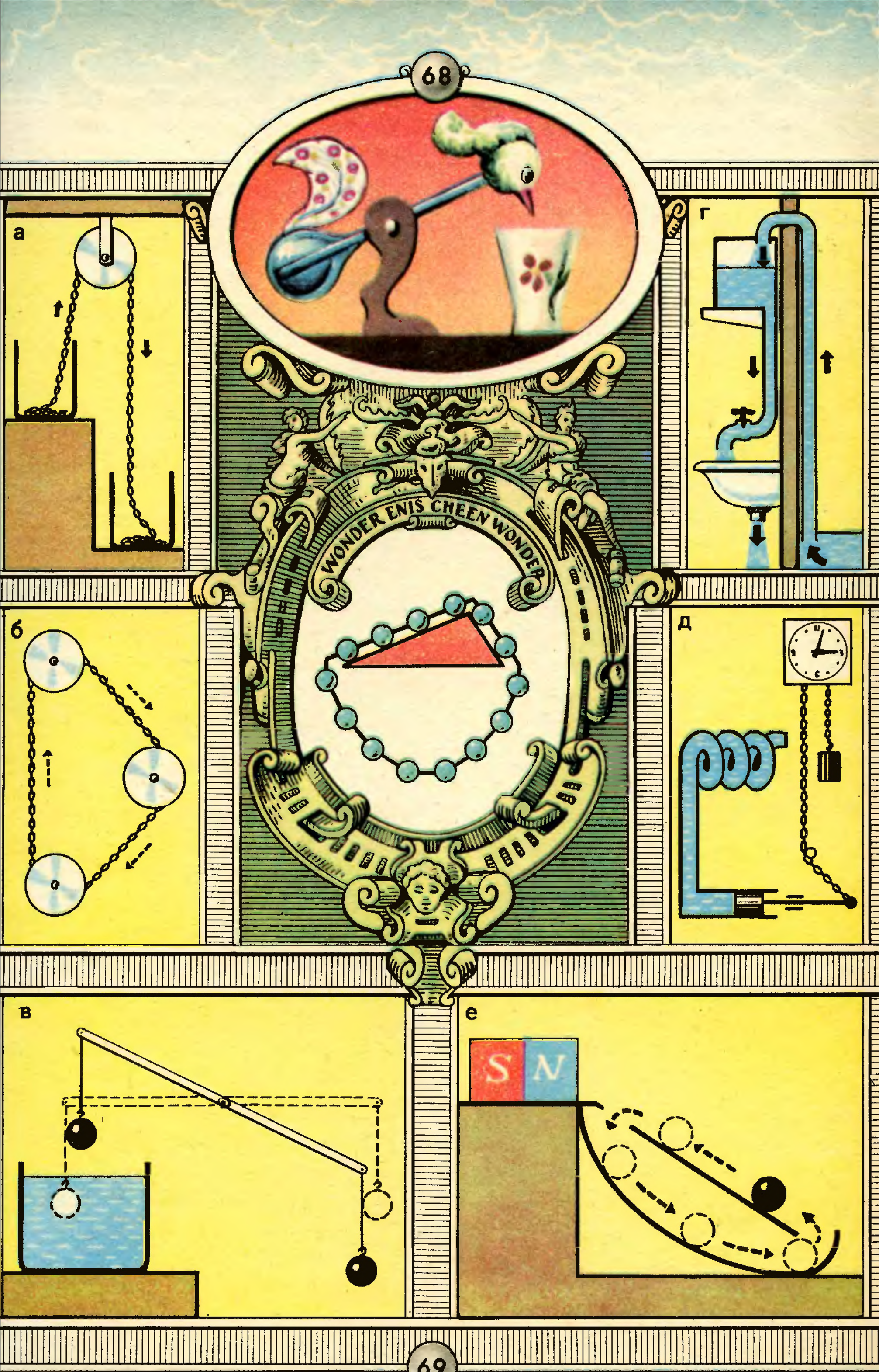
ряющаяся жидкость, пары которой заполняют все пространство. При охлаждении головы давление этих паров уменьшается. Тогда под избыточным давлением паров эфира в нижней ампуле эфир поднимается по трубочке, голова птички оказывается тяжелее и наклоняется к стаканчику. Как только жидкость достигнет конца трубочки, пары эфира из нижней ампулы прорвутся в верхнюю (головку), давление паров сравняется, жидкость потечет вниз, птичка вновь поднимет клюв. Не будь испарения влаги, не происходили бы все описанные явления. При испарении затрачивается энергия, которая берется от воды комнатной температуры и из окружающего воздуха. А вечный двигатель должен работать без затраты энергии. Поэтому «птичка Хоттабыча» не является вечным двигателем.

Все заводные игрушки и механизмы работают до тех пор, пока обладают запасом энергии, сообщенным при заводе, подобно часам, которые идут до тех пор, пока имеют запас потенциальной энергии закрученной пружины. Потенциальная энергия закрученной пружины в процессе работы превращается в другие виды энергии и передается другим частям механизма.

Великий закон природы — закон сохранения и превращения энергии — был открыт в середине XIX века. Но не сразу этот закон получил всеобщее признание. Уж очень заманчива была мысль построить такую машину, которая работала бы сама собой. Бесчисленные проекты всевозможных «вечных двигателей» предлагались людьми, недостаточно знакомыми с основами физики. Даже в наше время встречаются такие «изобретатели».

Представьте себя в роли консультанта бюро изобретений и выясните, в чем заключается ошибка в приводимых ниже проектах вечных двигателей.

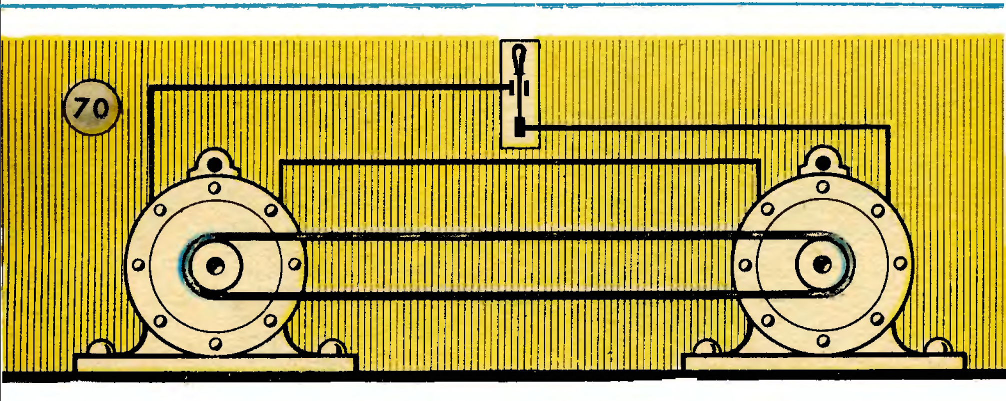
При разборе проектов не забывайте следующее. «Вечный двигатель» должен работать без подвода энергии. Создание «вечного двигателя» было бы чудом, но чудес не бывает. Если механизм, выдаваемый за «вечный двигатель», совершает работу, которая состоит в преодолении трения только в частях этого механизма, значит, он откуда-то получает энергию. Надо выяснить откуда. Все проекты «вечных двигателей» можно разбить на две группы: а) проекты, авторы которых не обнаруживают внешних источников энергии (см. «птичку Хоттабыча»), и б) проекты, содержащие ошибки, так как авторы проектов недостаточно хорошо знают законы физики.


а
б
в
г
д
е
WONDER ENIS CHEEN WONDER
S
N

Итак, познакомимся с некоторыми проектами «вечных двигателей». Будьте внимательны!

1. Через блок перекинута цепь (рис. 69, *а, б*). Свешивающаяся правая часть цепи под действием силы тяжести переходит с одного уровня на другой. Изобретатель уверен, что спущенная часть может быть снова поднята вверх, если связать концы цепи. Будет ли правая часть цепи перетягивать левую?

2. Два одинаковых шара уравновешены в воздухе на коромысле весов. Если один шар опустить в сосуд с водой, то вода будет выталкивать его и коромысло наклонится (рис. 69, *в*). Изо-



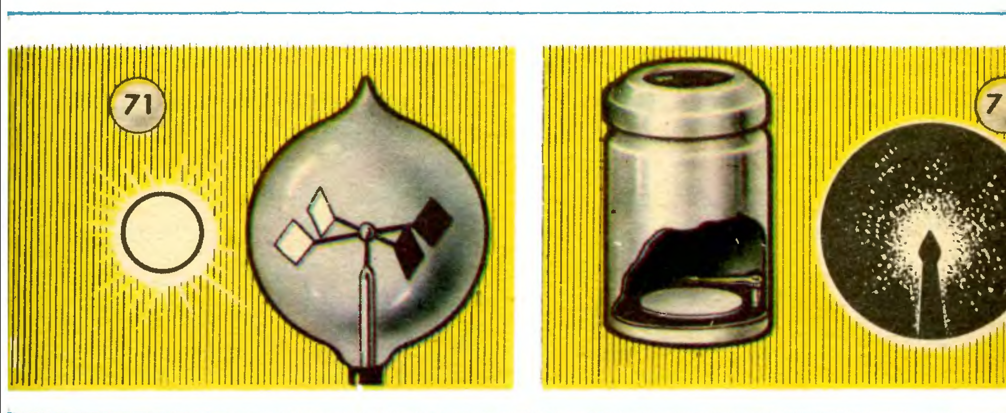
бретатель утверждает, что шар, выйдя на поверхность воды, снова приобретет свой вес, снова будет опускаться в воду, а коромысло вечно будет качаться. Проверьте проект на опыте и найдите ошибку в проекте. Подумайте, не совершает ли этот «двигатель» работу по преодолению силы трения и вязкости жидкости.

3. Вытекающая из водопроводного крана вода (рис. 69, *г*) должна создать в герметически закрытом водонапорном баке пустоту. Автор убежден, что атмосферное давление будет вечно пополнять убыль воды в баке.

4. *Самозаводящиеся часы.* При повышении температуры окружающего воздуха жидкость в радиаторе и соединенном с ним цилиндре будет расширяться и поршень, находящийся в цилиндре, придя в движение, поднимет гирю часов. Подъем гири не мешает ходу часов. Часовой механизм приводится в движение опускающейся гирей (рис. 69, *д*).

5. *Магнитный вечный двигатель.* Железный шарик, притягиваясь магнитом, поднимается по наклонной плоскости. Если в верхней части наклонной плоскости сделать отверстие (рис. 69, *е*), то шарик, провалившись через отверстие, упадет на желоб, скатится по нему и, обладая запасом кинетической энергии, снова попадет на наклонную плоскость, и так без конца.

6. Обычный предмет спора школьников, только что приступивших к изучению электричества. Генератор, однажды приведенный в движение, питает током электродвигатель (рис. 70).



Оси генератора и электродвигателя соединены между собой ременной передачей, поэтому электродвигатель поддерживает движение якоря генератора. Можно ли установку назвать вечным двигателем? К генератору по желанию можно подключить осветительную сеть или электродвигатель соединить со станком.

Решите задачу:

«Мощность генератора 4 кВт. Какой мощности электродвигатель можно соединить с этим генератором, если КПД генератора 80% и КПД двигателя тоже 80%?»

7. *Радиометр.* В баллон с разреженным воздухом помещена вертушка из легких алюминиевых крылышек. С одной стороны крылышки покрыты черной краской (рис. 71). Если недалеко от этого баллона поставить источник яркого света или сильно нагретый предмет, то вертушка начнет вращаться. Можно ли радиометр назвать вечным двигателем?

8. *Спинтарископ.* Дно короткой трубки представляет экран, покрытый сульфидом цинка — веществом, светящимся от удара альфа-частиц (рис. 72). Близ экрана укреплена игла, на острие которой находится небольшое количество вещества, испускающего альфа-частицы. Наблюдатель, смотрящий через окуляр (при полной темноте), увидит на экране частые вспышки. Ни днем, ни ночью не прекращается эффектное зрелище, напоминающее салют в небе. Бесспорно, что описанное явление сопровождается выделением энергии. Но можно ли назвать спинтарископ вечным двигателем?

В МИРЕ МОЛЕКУЛ

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Разведем в воде немножко туши и попробуем наблюдать в микроскоп каплю такой воды. Мы увидим, как маленькие частицы сажи, из которой приготовляется тушь, беспорядочно приплясывая, двигаются в прозрачной жидкости. Это и есть так называемое броуновское движение. Оно названо так по имени английского биолога начала XIX столетия Роберта Броуна. В 1827 году Броун обнаружил при помощи простого микроскопа хаотическое движение пыльцы растений, взвешенной в воде. Он писал: «Это движение, как я убежден, обусловлено не потоками в жидкости, не постепенным ее испарением, а принадлежит самим частицам».

Броуновское движение служит доказательством существования движения еще более мелких частиц — молекул жидкости, невидимых даже в самые сильные оптические микроскопы. Удары молекул заставляют видимые частицы сажи совершать хаотические перемещения.

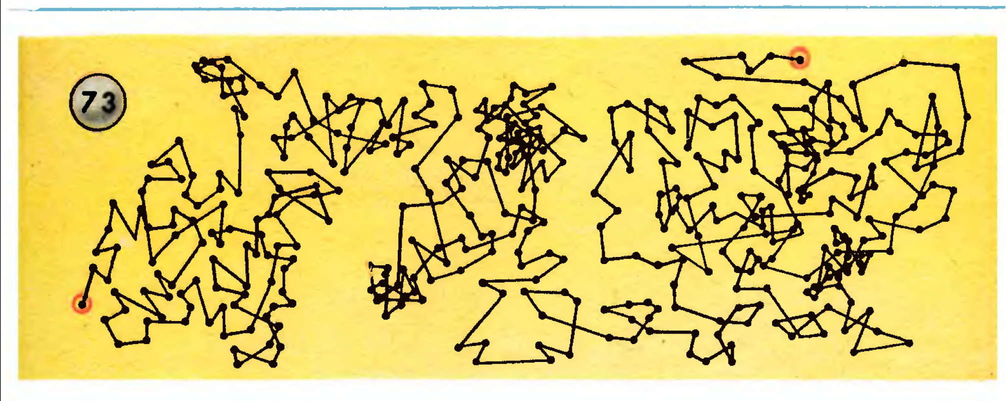
В поле зрения микроскопа видно много черных частичек различных размеров. Относительно крупные частицы, получая за некоторый промежуток времени примерно одинаковое число толчков во всех направлениях, не приходят в сколько-нибудь заметное движение.

Другое дело — малые частицы: за короткий промежуток времени они испытывают случайные нескомпенсированные, односторонние удары, отбрасывающие их в сторону.

Чтобы наблюдать броуновское движение, надо выбрать мелкие частицы сажи, терпеливо следить за их движением и отмечать на листе бумаги положение этих частиц через равные промежутки времени, например через 30 с.

Соединив отмеченные точки прямыми линиями, из многочисленных отрезков прямых получим сложную ломаную линию, демонстрирующую беспорядочное движение частицы (рис. 73).

Надо иметь в виду, что действительная траектория частицы еще сложнее, так как в течение отдельных полуминут частица



перемещалась не по прямой, а делала множество более мелких движений в различных направлениях.

Для тех, кому никогда не приходилось наблюдать броуновское движение в микроскоп, считаем не лишним привести описание пляски пылинок в воздухе, которые становятся заметными при косом освещении солнцем.

Вот как римский поэт Лукреций (ок. 99—55 гг. до н. э.) описывает в своей философской поэме «О природе вещей» движение пылинок в солнечном луче:

Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая,
Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света.
. . . .
Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно
Первоначала вещей в пустоте необъятной мятутся.

Так о великих вещах помогают составить понятье
Малые вещи, пути намечая для их постиженья.
Кроме того, потому обратить тебе надо вниманье
На суматоху в телах, мелькающих в солнечном свете,
Что из нее познаешь ты материи также движения,
Происходящие в ней потаенно и скрыто от взора.
Ибо увидишь ты там, как много пылинок меняют
Путь свой от скрытых толчков и опять отлетают обратно,
Вечно туда и сюда разбегаясь во всех направленьях.

Как узнали, сколько молекул содержится в 1 см^3 газа, каковы размеры молекул, их масса, скорость движения? Разве это возможно? Молекулы не видны, а их считают, измеряют, определяют их скорости!

Различными способами найдено, что в 1 см^3 любого газа при нормальных условиях (0°С и 760 мм рт. ст.) содержится около $2{,}7 \times 10^{19}$ молекул.

Чтобы представить себе, насколько велико это число, рассмотрим следующие примеры.

Представим себе ампулу объемом 1 см^3. Допустим, что ампула пуста. Каким-либо образом пробьем в ампуле тончайшее отверстие, такое, чтобы через него в 1 с могло проникать внутрь ампулы по 100 млн. молекул воздуха. Спрашивается, сколько времени понадобится, чтобы таким путем наполнить ампулу до нормальной плотности.

Подсчет показывает, что для этого нужно будет около 9000 лет.

Другой пример. Если взять число кирпичей, равное числу молекул в 1 см^3 газа при нормальных условиях, то, будучи плотно уложены, эти кирпичи покрыли бы поверхность всей суши земного шара слоем высотой 120 м, т. е. высотой, превосходящей почти в четыре раза высоту 10-этажного дома.

В капельке воды диаметром примерно 0,1 мм содержится 10^{16} молекул, т. е. в миллион раз больше, чем людей на Земле.

БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА

Движение молекул связано с тепловым состоянием тела. Чем более нагрето тело, тем оживленнее беспорядочное движение молекул. Термин «беспорядочное движение молекул» с полным

правом может быть заменен термином «тепловое движение молекул».

Вследствие хаотического движения молекулы, разлетаясь во все стороны, должны бы равномерно распределиться в предоставленном им объеме. Почему же воздух, окружающий Землю, не разлетается по всему мировому пространству? Его удерживает притяжение к Земле. Это притяжение нарушает равномерное распределение молекул в мировом пространстве. С другой стороны, если бы не тепловое движение, то все молекулы упали бы на Землю. В результате борьбы этих двух тенденций — падения вниз и стремления равномерно рассеяться в окружающем пространстве — в атмосфере наблюдается некоторое распределение плотности воздуха по высоте. Молекулы сосредоточены гуще в нижних слоях и реже в верхних. Математическое выражение этой закономерности дается формулой, называемой барометрической:

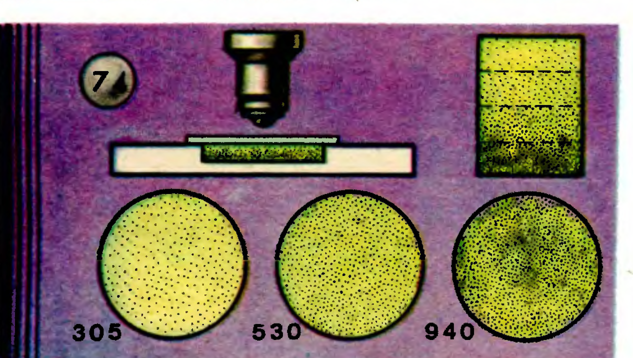
$$\rho=\rho_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}.$$

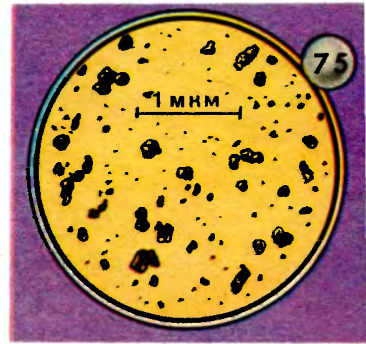
Здесь ρ — плотность воздуха на высоте h, ρ_o — плотность воздуха при $h=0$, m — масса молекулы, T — абсолютная температура воздуха, k — так называемая постоянная Больцмана ($k=$ $=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К). Описываемая барометрической формулой функция ρ есть показательная функция; ее основание выражается числом $e=2{,}71828...$ Такие показательные функции называют экспоненциальными. Заметим, что приведенная формула является упрощенной. Во-первых, как известно, воздух состоит из нескольких различных газов — азота, кислорода, водорода и др. Молекулы разных газов имеют разные массы. Чем легче газ, тем медленнее уменьшается с высотой его плотность. Во-вторых, в барометрической формуле предполагается, что температура воздуха одинакова на всех рассматриваемых высотах. Известно, однако, что температура воздуха с высотой понижается. В-третьих, надо учитывать также, что ускорение g зависит от высоты. Наконец, приведенная выше формула не учитывает ветра и конвекционных потоков воздуха, которые могут весьма заметно влиять на плотность воздуха.

Тем не менее барометрической формулой можно пользоваться как приближенной формулой, которая правильно передает основную закономерность в уменьшении плотности воздуха

с высотой. Эту формулу применяют по отношению к определенному типу газа и при этом рассматривают относительно небольшие высоты.

Подчеркнем, что описываемое барометрической формулой распределение плотности по высоте оказывается неизменным, сколько бы времени мы ни наблюдали (ветер не принимается во внимание). Молекулы воздуха находятся все время в движении, сталкиваются, перемещаются из одних точек пространства в другие; тем не менее в среднем их число в единице объема на данной высоте остается неизменным.





Рассмотренный закон распределения оказывается применимым не только к нижним слоям атмосферы Земли, но и к растворам, содержащим множество мелких частичек во взвешенном состоянии. Французский физик Перрен, изучавший броуновское движение, производил опыты с эмульсией спиртового раствора смолы гуммигута или мастики в воде. Предварительно жидкость подвергалась многократному центрифугированию для получения эмульсии, состоящей из очень мелких зернышек одинакового размера. Капля эмульсии помещалась в стеклянную кюветку и рассматривалась в микроскоп через маленькую диафрагму. Тогда в поле зрения можно было пересчитать видимые частицы. Изменяя высоту подвижной части микроскопа, можно получать четкие изображения частиц в разных слоях эмульсии, расположенных на разных глубинах кюветки (рис. 74). В каждом из этих слоев и подсчитывались зерна эмульсии. Чтобы исключить случайность, брали для каждого слоя среднее значение

из нескольких тысяч измерений. Применяя к этому распределению барометрическую формулу, Перрен смог определить число молекул в 1 моль любого газа.

Полученное значение очень мало отличалось от значения, определенного при помощи других способов. В настоящее время число молекул в 1 моль любого газа считают равным $6{,}02 \cdot 10^{23}$. Это число называют числом Авогадро. Известно, что 1 моль газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 л. Отсюда легко определить и число молекул в 1 $см^3$ газа при нормальных условиях:

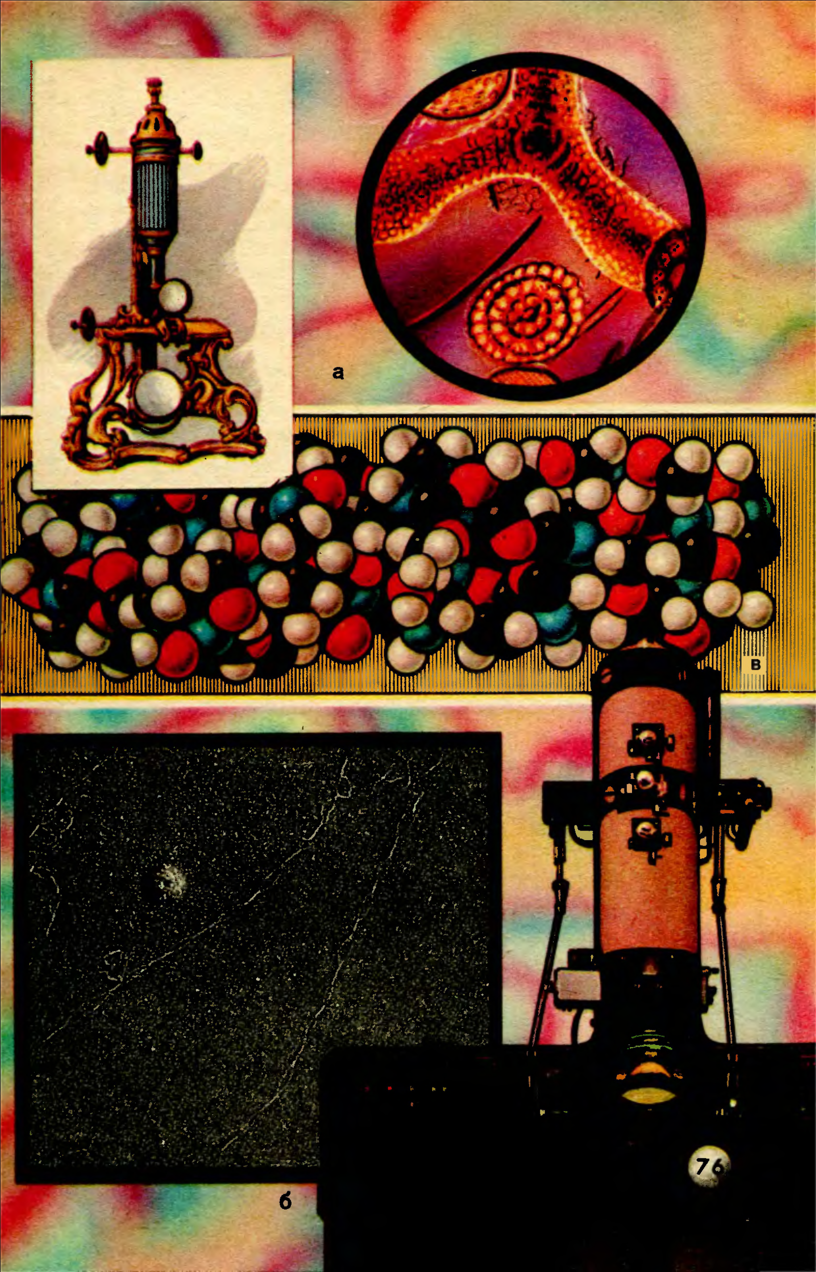
$$\frac{6.02 \cdot 10^{23}\,\text{моль}^{-1}}{22{,}4 \cdot 10^3\,\text{см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}} = 2{,}7 \cdot 10^{19}\ \frac{\text{молекул}}{\text{см}^3}.$$

Нет, конечно, необходимости объяснять, что найденное число передает только порядок количества молекул, т. е. оно приведено так же округленно, как, скажем, число, характеризующее плотность населения какого-нибудь города.

СТРУКТУРА И РАЗМЕРЫ МОЛЕКУЛ

Огромное число молекул, содержащихся в 1 $см^3$ газа, указывает на очень малые размеры самих молекул. Даже в самый сильный оптический микроскоп мы не можем увидеть молекул простого вещества. Только электронные микроскопы позволяют различить очертания некоторых сложных молекул, состоящих из сотен атомов. Посмотрите на рисунок 75, где приведена фотография молекул вируса гриппа, полученная с помощью электронного микроскопа. Каждый из видимых на этой фотографии комочков представляет собой сложную молекулу.

Стремясь проникнуть в тайны микромира, исследователи прошли длинный путь. В начале этого пути применялись оптические микроскопы, обеспечивавшие примерно 100-кратное увеличение (рис. 76, *а*). Современные оптические микроскопы, дающие предельное увеличение (до 2000), позволяют рассмотреть структуры с расстоянием между отдельными элементами до 0,25 мкм. Еще большее увеличение достигается при применении электронных микроскопов (рис. 76, *б*). Электронные микроскопы позволяют разглядеть структуры с расстоянием между элементами всего 0,001 мкм. Для расшифровки структуры молекул ученые проводят также исследования по рассеянию на исследуемом ве-


а
в
б
76

честве рентгеновских лучей, пучков электронов, пучков нейтронов низких энергий, т. е. применяют методы рентгенографии, электронографии, нейтронографии. В результате стало возможным выявление молекулярной структуры любого соединения, каким бы сложным оно ни было. Сконструированы структурные модели самых различных молекул, включая и очень сложные молекулы органических соединений. Одна из таких моделей представлена на рисунке 76, *в*. Это есть модель структуры одной из белковых молекул; разным цветом здесь показаны атомы разных химических элементов.

Существуют разнообразные способы определения размеров молекул. Один из них состоит в следующем. Если вылить на поверхность воды в каком-нибудь сосуде крошечную капельку масла, она растечется, образовав тончайшую пленку. Как бы ни была тонка эта пленка, она состоит не меньше чем из одного слоя молекул. Определить толщину пленки нетрудно. Допустим, что мы вылили капельку масла объемом 0,001 $см^3$ на поверхность воды; при этом оказалось, что, растекаясь, капелька масла образовала тонкую пленку площадью 0,5 $м^2$, т. е. 5000 $см^2$. Зная объем пленки (равный объему капельки) и ее поверхность, найдем толщину пленки:

$$d = \frac{0{,}001\ см^3}{5000\ см^2} = 2 \cdot 10^{-7}\ см.$$

Поперечник молекулы на самом деле еще меньше. Диаметр простых молекул (если условно принимать их за «шарики») по порядку величины равен 10^{-8} см, т. е. 10^{-4} мкм.

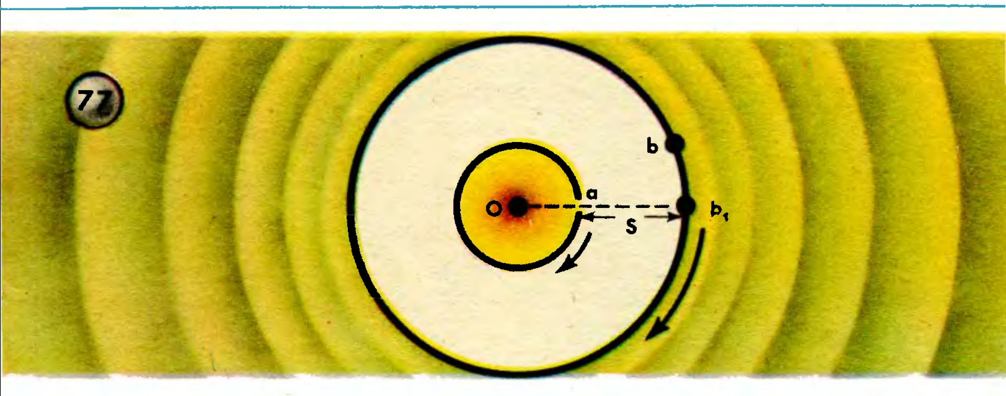
КАК ИЗМЕРИЛИ СКОРОСТЬ МОЛЕКУЛ

Скорость движения молекул впервые была определена в 1920 году немецким физиком Штерном. Опыт Штерна заключается в следующем. По общей оси двух цилиндров, вращавшихся с одинаковой угловой скоростью, натянута посеребренная платиновая проволока *O*, которая накаливается электрическим током (рис. 77). При температуре 1200°С молекулы серебра испаряются с поверхности проволоки и часть их вылетает через узкую щель, прорезанную вдоль внутреннего цилиндра (щель *a* на рисунке). На холодной стенке внешнего цилиндра частицы серебра осаждаются в виде серебряной полоски. Однако за то

время, в течение которого частица пролетает расстояние s между цилиндрами, стенки их поворачиваются на некоторый угол (точка b на стенке внешнего цилиндра переходит в положение b_1). Измеряя этот угол, можно подсчитать время поворота внешнего цилиндра, а следовательно, и время t движения частицы от щели до стенки второго цилиндра. Отсюда легко определить и скорость молекулы серебра:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Измеренная таким способом скорость молекул оказалась



близкой к теоретически рассчитанной и для серебра заключалась в пределах от 50 до 625 м/с.

Значение этого опыта состоит в том, что его результаты совпали с результатами, полученными теоретически на основании молекулярно-кинетической теории; таким образом, правильность выводов теории подтвердилась.

Ниже приводятся средние скорости молекул некоторых газов и паров, полученные теоретически (при 0°С и 760 мм рт. ст.).

Газ	Скорость, м/с
Водород	1692
Кислород	425
Азот	454
Водяной пар	566

Как видите, эти скорости громадны. Их можно сравнивать лишь со скоростями пуль и артиллерийских снарядов.

ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ И СТАТИСТИКА

Посмотрите внимательно на следующую таблицу, где показано, как распределяются молекулы азота по скоростям:

Скорость, м/с	Доля числа молекул, имеющих скорость в указанном интервале значений
Меньше 10	0,01
От 100 до 300	0,25
От 300 до 500	0,42
От 500 до 700	0,24
От 700 до 900	0,07
Свыше 900	0,01

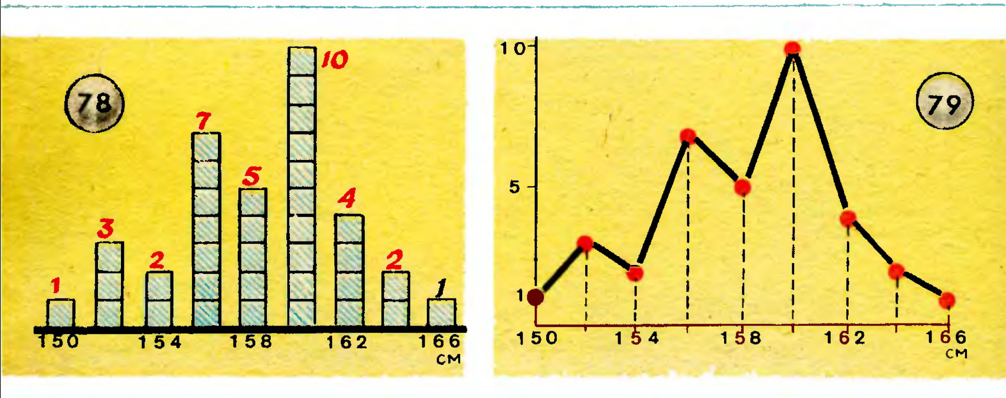
Ранее мы приводили для азота значение скорости, равное 454 м/с. Это было среднее значение. В действительности же в газе имеются молекулы с разными скоростями — как выше, так и ниже средней скорости. Иными словами, существует некоторое распределение молекул по скоростям.

Движение отдельной молекулы можно в принципе описать на основе законов механики, если учесть столкновения этой молекулы с другими молекулами и воспользоваться для каждого столкновения законами сохранения энергии и импульса. Правда, чтобы учесть столкновения, надо знать, чему равны координаты и скорости всех молекул газа в тот или иной момент времени. При невообразимо огромном числе молекул, имеющихся в любом разумно выбираемом объеме газа, такая программа оказывается заведомо невыполнимой. В применении к большому коллективу молекул законы механики оказываются непригодными. Здесь действуют иные законы — так называемые статистические законы.

Чтобы получить представление о статистических законах, обратимся к простому примеру. Предположим, что мы измеряем рост учеников в классе. Пусть в классе имеется 35 учеников. При измерении оказалось, что один ученик имеет рост 150 см, трое —

152 см, двое — 154 см, семь — 156 см, пять — 158 см, десять — 160 см, четверо — 162 см, двое — 164 см, один — 166 см. Изобразим результаты измерений в виде диаграммы, заменяя числа учеников с одинаковым ростом столбиками соответствующей высоты (рис. 78). Впрочем, столбики мы могли бы не рисовать. Можно было бы начертить график распределения 35 учащихся по росту (рис. 79). Колебания кривой, как видите, получились большие, и закона распределения еще не чувствуется.

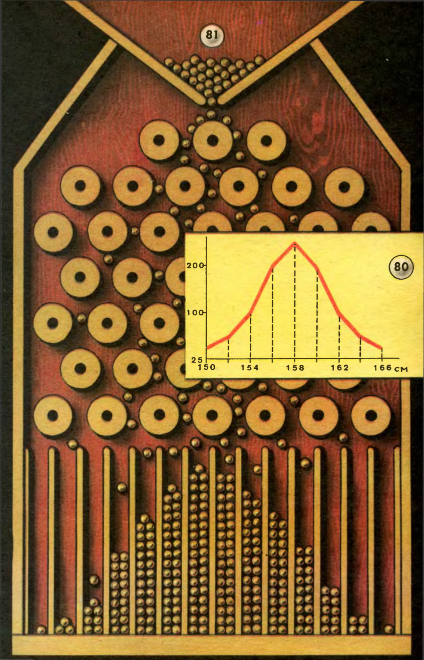
При массовом обследовании учащихся, когда число измерений составит несколько тысяч, на графике получается кривая,



которую называют нормальной кривой распределения случайных признаков (рис. 80). По нормальной кривой можно судить о границах роста большинства встречающихся случаев. Определенному классу, т. е. определенной возрастной группе, свойственны определенные границы роста для большинства учащихся. Отклонения от этих границ немногочисленны.

Примерно так же устанавливаются спортивные нормы, например, в беге, стрельбе, прыжках и пр. для каждой возрастной группы учащихся. Чем больше учащихся будет обследовано, тем более плавной получится кривая распределения.

Можно поставить интересный опыт, если смастерить так называемую доску Гальтона. Надо взять широкую ровную и гладкую доску и специальным клеем закрепить на ее поверхности большое число одинаковых деревянных цилиндриков (например, сердцевин от обычных катушек из-под ниток), расположив их так, как показано на рисунке 81. Доску поставим наклонно. Че-


81
80
200
100
25
150
154
158
162
166 см

рез своеобразную воронку, расположенную в верхней ее части, будем постепенно сыпать дробь (или горох). В нижней части доски укрепим ряд вертикальных перегородок, между которыми будет собираться дробь, скатывающаяся по доске. По краям доски следует прибить невысокие стенки. Каждая дробинка на своем пути от воронки до нижнего края доски испытает ряд столкновений с торчащими на поверхности доски цилиндриками. Цилиндрики размещены по поверхности доски так, что всякий раз дробинке равновероятно скатиться как с левого, так и с правого края цилиндрика. Накопившиеся между перегородками дробинки (при достаточно большом их количестве) наглядно демонстрируют нормальную кривую распределения (см. рисунок).

И в мире молекул распределение скоростей подчиняется определенному закону. Нельзя говорить о температуре или давлении одной или небольшого числа (5, 10 или 100) молекул. Движение одной какой-нибудь молекулы не характеризует свойств газа. Законы тепловых движений не могут быть сведены к законам механики. Тепловое движение представляет собой более сложную форму движения по сравнению с механическим перемещением. Массовость и случайность являются основными условиями для применения статистических законов. Поэтому мы не можем, например, сказать, сколько молекул данного газа в данный момент имеет скорость 454 м/с, но мы можем говорить, что, вероятно, встретим в данном объеме газа при данной температуре определенный процент молекул, скорость которых лежит в пределах, скажем, от 400 до 500 м/с.

Обозначим через $\Delta n(v)$ число молекул в единице объема, скорости которых попадают в интервал значений от v до $v+\Delta v$. При достаточно малых Δv можно считать, что

$$\Delta n(v)=F(v)\Delta v\,.$$

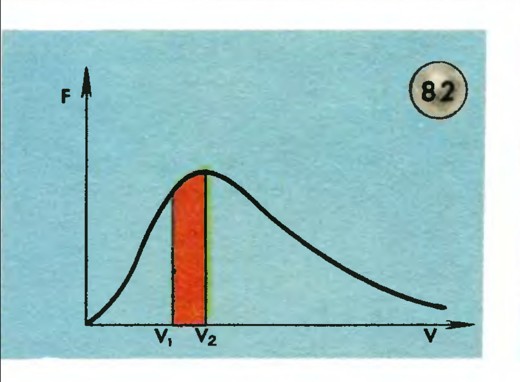
Вид функции $F(v)$ был установлен великим английским физиком Максвеллом:

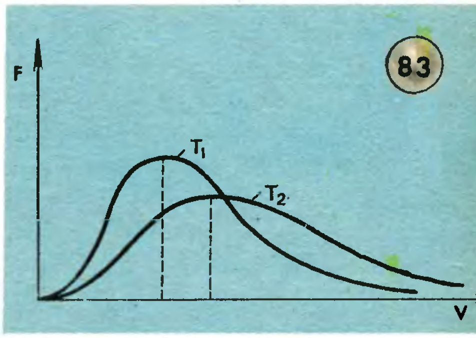
$$F(v)=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}\,.$$

Здесь m — масса молекулы, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура газа. График функции $F(v)$ (знаменитое распределение Максвелла) показан на рисунке 82. При достаточ-

но малых значениях скорости эта функция ведет себя как парабола av^2; при больших скоростях она ведет себя как экспоненциальная функция $e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$. Средняя скорость молекулы примерно соответствует той скорости, при которой функция $F(v)$ принимает наибольшее значение.

Выберем два значения скорости: v_1 и v_2. Доля молекул, имеющих скорости в интервале значений от v_1 до v_2, равна отношению закрашенной на рисунке площади ко всей площади под кривой $F(v)$.





Молекулы сталкиваются друг с другом; их скорости все время изменяются не только по направлению, но и по модулю. Тем не менее число молекул в некотором выбранном интервале значений скорости остается практически неизменным. Иными словами, показанное на рисунке 82 распределение оказывается постоянным во времени. Чтобы изменить его, надо изменить температуру газа.

На рисунке 83 показаны два распределения Максвелла — одно при температуре T_1, другое при температуре T_2, причем $T_2 > T_1$. Видно, что с повышением температуры максимум распределения смещается в сторону более высоких скоростей. Это означает, в частности, что с повышением температуры увеличивается среднее значение скорости молекулы.

Статистические законы распределения применяются в науке, в различных отраслях хозяйства, экономической жизни, вопросах страхования и т. д.

ТВЕРДОЕ, ЖИДКОЕ, ГАЗООБРАЗНОЕ

Наука познает строение вещества. На основе этого познания люди, владеющие техникой, научились создавать новые материалы, которые не могла создать природа, причем не вообще новые материалы, а материалы с заданными свойствами. В одном случае этим свойством может быть легкость, в другом — механическая прочность, в третьем — стойкость против коррозии и т. д. Но прежде чем люди научились создавать новые материалы, они исследовали внутреннее строение вещества.

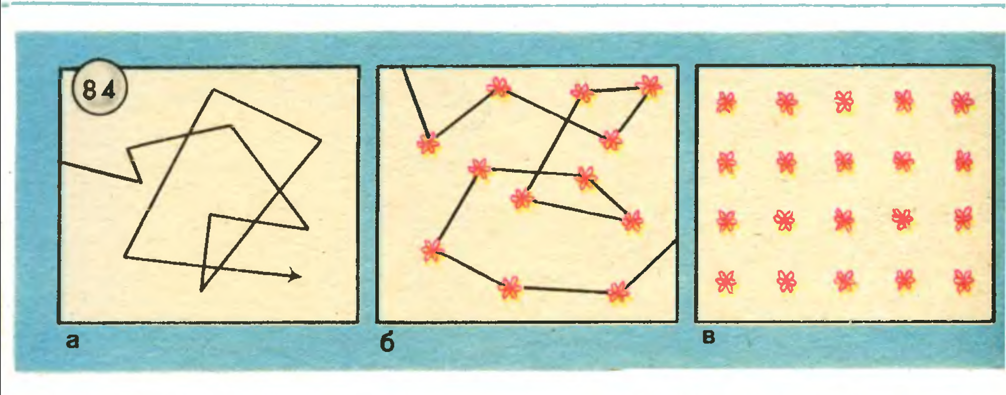
Успехи, достигнутые в этой области науки, очень велики. Но и перед будущими исследователями остается огромное поле деятельности. Быть может, и вы, юные читатели, внесете свой вклад в науку о строении вещества.

Вы, вероятно, слышали, что вещество может быть не только в твердом, жидком и газообразном состоянии, но и в состоянии плазмы. Это уже четвертое состояние вещества. Плазмой называется ионизированный газ. В состоянии плазмы находится газ в светящихся люминесцентных трубках реклам и трубках дневного света. Вещество, из которого состоят раскаленные газообразные небесные тела (Солнце и многие другие звезды), находится в состоянии плазмы. Но, с другой стороны, открыты звезды, поражающие своей огромной плотностью. Вещество этих звезд состоит из атомов, лишенных электронных оболочек, т. е. из атомных ядер, и поэтому плотность такого вещества может в тысячи раз превышать плотность воды (ядра атомов по размерам в сотни тысяч раз меньше самих атомов). Это новое, видимо, еще неизвестное вам, читатели, пятое состояние вещества.

Рисунок 84 поясняет различие между твердым, жидким и газообразным состоянием вещества. В газообразном состоянии (рис. 84, *а*) молекулы движутся, почти не испытывая притяжения друг к другу. Сталкиваясь между собой несколько миллиардов раз в секунду, они меняют направление движения. В жидкости (рис. 84, *б*) молекулы расположены существенно более тесно, плотность жидкости больше плотности газа, а поэтому проявление сил взаимодействия между молекулами более заметно. Движение молекул жидкости затруднено. Как трудно бывает нам выбраться из густой толпы людей, так и молекуле, находящейся в тесном окружении других молекул, трудно вырваться из ограниченного пространства. Возникнет случайное разрежение по

соседству - молекула проникнет в него, но только для того, чтобы попасть в окружение других молекул и метаться среди них до тех пор, пока не появится новое разрежение.

В твердых телах (рис. 84, *в*) силы взаимодействия между молекулами так велики, что энергии движения молекул недостаточно, чтобы преодолеть притяжение соседних молекул. Поэтому молекулы вынуждены совершать колебательное движение. Подобно тому как маятник периодически возвращается к положению равновесия, так и молекулы твердого тела колеблются около некоторых центров.



Могут ли молекулы, между которыми действуют силы взаимного притяжения, сблизиться до полного соприкосновения? Чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить, что молекула не твердый шарик. Она состоит из атомов, а атомы в свою очередь устроены довольно сложно. Вокруг положительно заряженного ядра атома обращаются отрицательно заряженные электроны; в простейшем случае — один (атом водорода), а в сложных — свыше ста. Сила притяжения между противоположно заряженными частицами удерживает электроны на орбите. Электронная оболочка является барьером, преграждающим доступ во внутренний мир атома, и преодолеть его очень трудно.

Поскольку одноименные электрические заряды отталкиваются, то вещество не может слиться в сплошную массу.

Силы притяжения и отталкивания зависят от расстояния между частицами. Эти силы действуют одновременно. На некотором расстоянии r_0 указанные силы уравновешиваются. Если бы не бы-

ло теплового движения, то между молекулами все время сохранялось бы это расстояние. При сближении частиц силы отталкивания возрастают быстрее, чем силы притяжения. При удалении частиц на расстояние большее, чем r_0, начинают преобладать силы притяжения. На расстоянии r_0 частицы находятся в состоянии устойчивого равновесия.

Зная, как распределяются силы взаимодействия, можно построить график потенциальной энергии частиц (рис. 85). В состоянии устойчивого равновесия частицы обладают минимумом потенциальной энергии (на графике — наибольшая глубина впадины).

При изменении расстояния между частицами вещества происходят превращения энергии. При уменьшении расстояния между частицами нарушается устойчивое равновесие, при этом производится работа против сил отталкивания, что приводит к уменьшению кинетической энергии частиц до нуля. Так что собственно «удара» одной частицы о другую, подобного удару бильярдных шаров, не происходит, хотя мы и говорим о «столкновении частиц вещества».

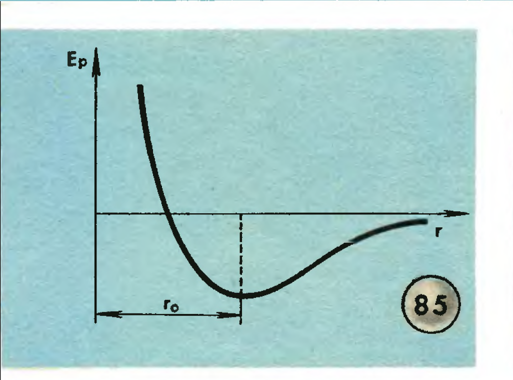
Мы рассказывали обо всем этом для того, чтобы помочь нашим читателям избавиться от часто допускаемой ошибки — представлять себе молекулы в виде маленьких сплошных шариков. Молекулы имеют сложное строение. Не представляет собой сплошного вещества и атом. Нельзя считать сплошным и ядро.

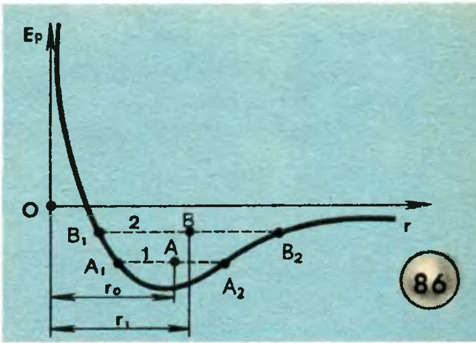
Если бы ядро было сплошным, то кубик в 1 см^3, изготовленный из ядерного вещества, весил бы несколько миллионов тонн. В окружающем нас мире нет таких ядер. Но в глубинах вселенной астрономы обнаружили очень тяжелые звезды. Атомы вещества, из которого состоят эти звезды, лишены электронной оболочки, поэтому плотность этого вещества исключительно велика. Так, например, плотность звезды Сириус *B* равна 300 000 г/см^3, стакан такого вещества имел бы массу 60 т. Звезда Ван-Манена состоит из вещества, плотность которого в 400 000 раз больше плотности воды.

Анализ сил притяжения и отталкивания позволяет также ответить на вопрос, почему твердые тела при нагревании расширяются. Объяснение, справедливое для газов, объем которых (при неизменном давлении) зависит от температуры, не годится. Встречающееся иногда простое объяснение, в основе которого

лежит предположение, что причиной является увеличение размаха колебаний молекул при нагревании твердого тела, тоже бессильно разъяснить его расширение: ведь как бы ни были велики размахи колебаний двух частиц около двух центров, это не изменит расстояния между самими центрами.

Для объяснения расширения тела при нагревании обратимся к рисунку 86. Здесь изображен уже знакомый читателю график потенциальной энергии двух взаимодействующих молекул. Рассмотрим два случая, отвечающие разным температурам тела. При более низкой температуре молекула совершает колебания





около точки A в пределах отрезка A_1A_2. Среднее расстояние между взаимодействующими молекулами (вторую молекулу мы мысленно поместили в начало координат) есть в данном случае r_0. При более высокой температуре энергия колебаний повышается; теперь молекула колеблется в пределах отрезка B_1B_2. Положению равновесия теперь соответствует середина отрезка B_1B_2, т. е. точка B; среднее расстояние между взаимодействующими молекулами оказывается равным $r_1 > r_0$. Таким образом, с повышением температуры среднее (равновесное) расстояние между молекулами увеличивается, чем и объясняется расширение тела при нагревании.

Читатель может заметить, что вода при нагревании от 0 до 4°C ведет себя иначе — она не расширяется, а, напротив, сжимается. Эта особенность воды связана с уплотнением ее молекулярной структуры, проявляющимся в указанном диапазоне температур, и требует отдельного рассмотрения.

ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для изучения физического явления не обязательно пользоваться дорогими и сложными приборами. Физика скрывается не только в блестящих приборах, но и в самой жизни, всюду вокруг нас. Надо только уметь увидеть ее. Например, сидя за чайным столом, можно наблюдать многие физические явления. Вот на тему о физике поверхностей мы и собираемся побеседовать. И пусть это будет не просто беседа. Попробуйте на собственном опыте проверить все нижеописанные явления. Прибором в данном случае может служить чашка чаю или стакан воды.

Первый взгляд на чай, налитый в чашку, подтверждает известное положение, что жидкость своей формы не имеет, а принимает форму сосуда, в который она налита. Поверхность жидкости не зависит от формы сосуда; она представляет собой гладкую, как зеркало, плоскость. Впрочем, не совсем так. Форма поверхности жидкости есть форма, концентричная поверхности земного шара. Правда, чтобы подметить это, надо было бы иметь «чашку» слишком больших размеров. В обычных чашках поверхность налитой жидкости можно принимать за горизонтальную плоскость. Однако и здесь требуется поправка. Приглядитесь внимательнее, и вы заметите, что у краев поверхность жидкости приподнята и образует вогнутую форму (рис. 87). Это — следствие поверхностного натяжения, причину которого мы сейчас выясним, а пока познакомимся с еще более заметным проявлением того же свойства жидкости. Опустите в чашку чайную ложку. Вы увидите, во-первых, что поверхность жидкости искривлена в местах соприкосновения ложки с жидкостью, во-вторых, что между ложкой и стенкой чашки жидкость приподнята по сравнению с уровнем в широкой части (рис. 88). Чем ближе будет ложка к стенке чашки, тем выше поднимется уровень жидкости в узкой части. Если у вас найдется узкая стеклянная трубочка, то подъем жидкости в ней можно подметить без труда (рис. 89). В трубке диаметром 1 мм вода поднимается на 30 мм.

На высоту поднятия оказывает влияние также и температура жидкости. На 30 мм вода поднимается при 0°С. При 80°С она поднимется только на 25 мм.

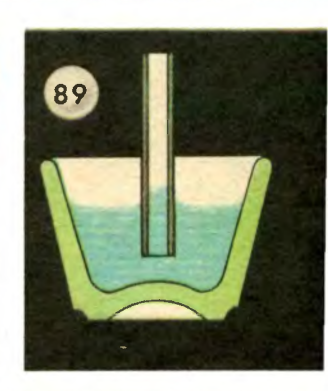
Оказывается, с повышением температуры жидкости уменьшается поверхностное натяжение ее.

Что же такое поверхностное натяжение? На рисунке 90 в увеличенном, схематичном изображении показан вертикальный разрез жидкости. Между молекулами действуют силы взаимного притяжения, но на расстоянии не больше $5 \cdot 10^{-8}$ — 10^{-7} см. Молекулу *1* притягивают окружающие ее со всех сторон соседние молекулы одинаково сильно. В результате эти силы притяжения уравновешиваются, или, другими словами, равнодействующая всех сил молекулярного притяжения равна нулю.

Для молекулы *2*, расположенной на поверхности, равновесия







молекулярных сил уже нет, и равнодействующая сил притяжения молекулы *2* ее соседними молекулами направлена вниз, в глубь жидкости. Если мы увеличиваем поверхность жидкости, а это попросту означает, что мы поднимаем из глубины на поверхность новые молекулы, то при этом мы совершаем работу против сил, направленных внутрь жидкости. Энергия, затраченная на эту работу, передается молекулам поверхностного слоя, поэтому они обладают добавочной потенциальной энергией. Это энергетическое состояние поверхностного слоя характеризуется коэффициентом поверхностного натяжения, или проще, поверхностным натяжением. Поверхностное натяжение выражается в единицах работы на единицу площади и вычисляется как работа, необходимая для увеличения площади поверхности на единицу.

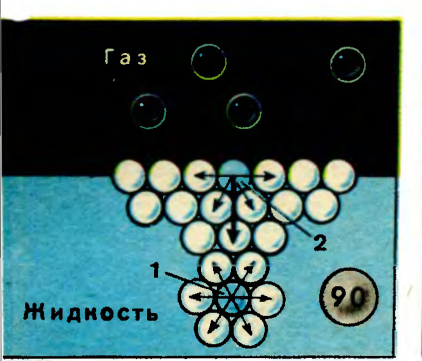
Можно показать, что из определения поверхностного натяжения легко получить наименование единицы: Н/м. Действительно,

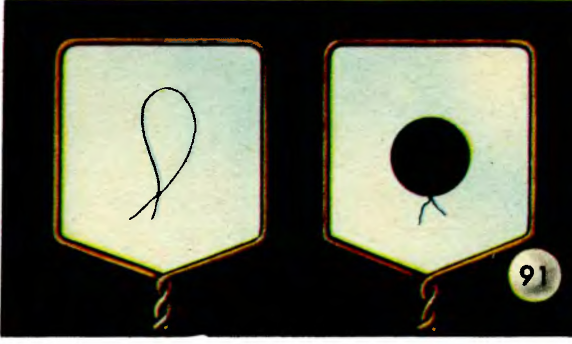
Дж=Н·м, поэтому

$$\frac{Дж}{м^2}=\frac{Н\cdot м}{м^2}=\frac{Н}{м}.$$

Следовательно, поверхностное натяжение можно выражать и в единицах силы на единицу длины.

О какой длине идет речь? Об участке длины границы, по которой жидкость соприкасается с твердым телом (например, стенками сосуда). Поверхностное натяжение показывает, с какой силой поверхностный слой стремится сократить на единицу длины свой фронт, свои границы.





«Стремление» поверхности жидкости сокращаться до возможного минимума можно наблюдать на многих явлениях. Еще Галилей задумывался над вопросом: почему капли росы, которые он видел по утрам на листьях капусты, принимают шарообразную форму? Утверждение, что жидкость не имеет своей формы, оказывается не вполне точным. Собственная форма жидкости — шар.

Из всех других геометрических форм шар обладает при данном объеме наименьшей поверхностью. Шар — наиболее емкая форма.

Небольшое количество жидкости легко образует и сохраняет шарообразную форму. Большое количество жидкости не может сохранить шарообразную форму: она изменяется под действием силы тяжести. Если устранить влияние силы тяжести, то под действием молекулярных сил жидкость принимает форму шара. Например, капли дождя в воздухе имеют форму шара. Во время

падения капли все ее частицы движутся с одинаковой скоростью, а потому она не деформируется.

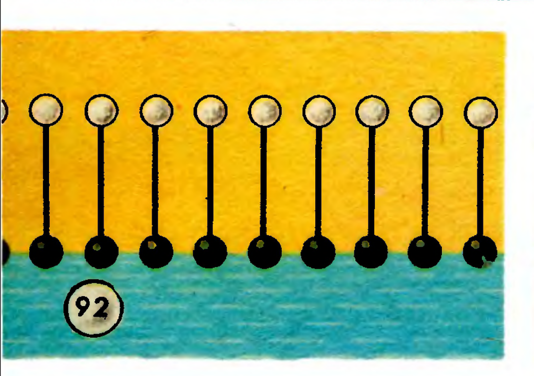
Условия невесомости искусственно легко воспроизводятся в следующем опыте. Жидкое масло наливают в смесь спирта и воды. Плотность этой смеси должна быть равна плотности масла. Тогда сила тяжести уравновесится выталкивающей силой и силы молекулярного притяжения образуют масляный шар, свободно парящий в смеси. Можно получить шар диаметром в несколько сантиметров. Если в масляный шар внести на проволоке небольшой диск и вращать проволоку между пальцами, то весь шар придет в движение. При этом он слегка сплющится (как сплюснуты вращающиеся вокруг своих осей планеты). Можно добиться, чтобы от шара отделилось кольцо, подобное кольцу Сатурна. Кольцо это в конце концов разорвется и распадется на несколько небольших шариков.

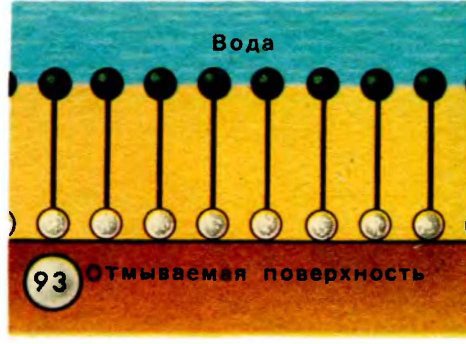
Впервые такой опыт был выполнен в 1849 году под руководством бельгийского ученого Плато. Сам Плато не мог любоваться столь эффектным явлением: он совершенно ослеп еще в 1843 году. Поводом, побудившим профессора к этим опытам, был такой случай. Нечаянно он налил в смесь спирта и воды небольшое количество масла, и оно приняло форму шара. Размышляя над этим фактом, Плато наметил ряд опытов, которые и были впоследствии блестяще выполнены его учениками и друзьями. Будучи слепым, Плато продолжал свои интересные исследования. В своем дневнике по поводу этого явления он записал полезное и для вас, будущие исследователи, правило: «вовремя удивляться».

Наблюдать «стремление» системы к минимуму потенциальной энергии можно и на других простых опытах, прежде всего на мыльных пузырях. Стенка мыльного пузыря, или мыльная пленка, представляет собой двойной поверхностный слой. Рамку, изготовленную из проволоки, погрузим в мыльный раствор и вынем. Она окажется затянутой довольно прочной пленкой. Бросим на нее нитяную петельку. Форма петли будет неправильная. Если же спичкой проткнуть пленку внутри петельки, то внешняя часть пленки, стремясь сократиться, растянет нитку в окружность (рис. 91). Так как окружность охватывает самую большую площадь при данном периметре, то уцелевшая часть пленки будет иметь наименьшую площадь, чем при любой другой форме петли.

Поверхностный слой воды имеет такое же свойство, как и мыльная пленка. Но поскольку образовать в нем отверстие нам не удастся, мы попробуем уменьшить поверхностное натяжение внутри петельки, брошенной на воду. Для этого надо ввести внутрь петельки ничтожное количество жидкости с меньшим, чем у воды, поверхностным натяжением, например спирта, одеколона.

Можно проделать еще такой интересный опыт. Мелко нарезанные бумажки или какой-нибудь порошок (мука, пудра) насыпем ровным слоем на поверхность воды в стакане. Стоит





коснуться поверхности воды проволочкой (или спичкой), смоченной предварительно одеколоном, и словно чудо произойдет перед вашими глазами на поверхности воды: плавающие кусочки разбегутся от проволочки. Так сократит свою поверхность слой чистой воды. Поверхность вокруг проволочки подобна круглой дырке, какую мы наблюдали в мыльной пленке.

Такое же явление можно наблюдать, если коснуться поверхности воды кусочком мыла. Последнее сильно уменьшает поверхностное натяжение воды. Вещества, которые, будучи примешаны к воде, уменьшают ее поверхностное натяжение, называются поверхностно-активными. Молекулы поверхностно-активных веществ представляют собой длинные цепочки из атомов углерода, окаймленные по всей длине атомами водорода. Концы такой цепочки имеют различные свойства (полярность). На одном из концов концентрируются кислородсодержащие группы атомов с большой химической активностью. Противоположный конец,

наоборот, малоактивен, нейтрален. В результате на поверхности воды молекулы поверхностно-активных веществ, например молекулы мыла, устанавливаются своими активными концами вниз, к воде (рис. 92), подобно поплавку рыболова, который под действием грузила устанавливается вертикально.

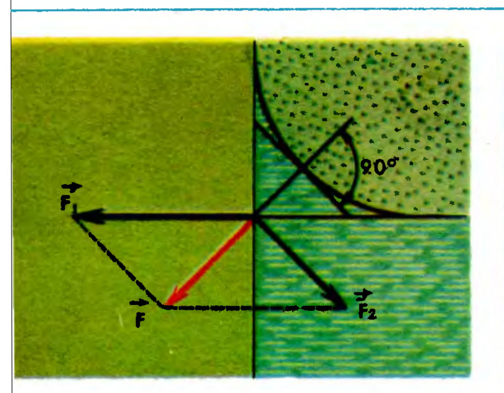
Приходилось ли вам мыть посуду, загрязненную жиром? Отмыть тарелку от жира чистой холодной водой трудно. Вода не смывает жир с поверхности. Если чистую воду заменить мыльной, то жир легко отмоется. Поверхностно-активное мыло оттесняет жир, занимает его место на поверхности. Мыло в отличие от жира легко растворимо в воде и легко смывается ею. Действие мыла при мытье объясняется соответствующим расположением молекул, как показано на рисунке 93.

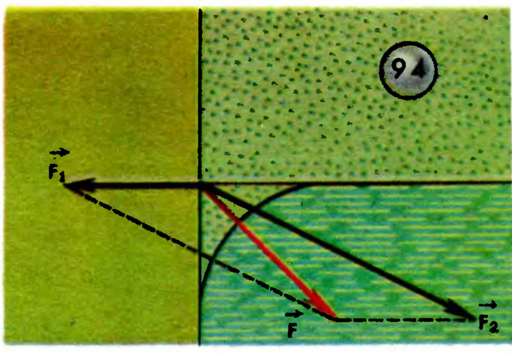
Проделайте еще такой опыт. На поверхность воды, налитой в блюдце, опустите (осторожно) плашмя лезвие безопасной бритвы. Оно будет плавать и даже может принять на себя небольшой добавочный груз. Поверхность этой стальной пластинки покрыта незаметным для глаз слоем жира и не смачивается водой. Если к воде прибавить немного какого-нибудь поверхностно-активного вещества (мыла, спирта, керосина), опыт с лезвием не удастся, лезвие потонет.

Поверхность твердых тел может притягивать к себе и удерживать газы и пары. Это явление носит название адсорбции. В основе его лежит действие электрических сил у поверхности тела. Подробно рассматривать это действие мы сейчас не будем. Степень адсорбции, т. е. количество поглощаемого газа, зависит от природы как твердого тела, так и газа. Весьма большой способностью адсорбировать газы обладает активированный уголь (мелко раздробленный и освобожденный от смолистых примесей прокаливанием в присутствии водяного пара). Такой активированный уголь применяется в противогазах, созданных академиком Н. Д. Зелинским.

Теперь объясним явление смачивания и несмачивания жидкостями поверхности твердых тел. Рассмотрим поведение молекулы жидкости в месте соприкосновения ее с твердой стенкой. Оставляя в стороне взаимодействие этой молекулы с молекулами воздуха, мы можем сказать, что на молекулу действуют силы притяжения к молекулам жидкости и к стенке сосуда. В зависимости от того, какая из этих сил больше, будет наблюдаться смачивание или несмачивание. Найдем равнодействующую

сил, действующих на нашу молекулу. В случае смачивания она будет направлена внутрь стенки. Это хорошо видно на рисунке 94 слева, где $\vec{F}_1$ — сила притяжения к молекулам стенки, а $\vec{F}_2$ — к молекулам жидкости; равнодействующая $\vec{F}$ направлена внутрь стенки. Но в таком случае молекула не может оставаться в равновесии на горизонтальной поверхности, как не может оставаться неподвижным на гладкой горизонтальной плоскости шарик, если на него нажимать пальцем с силой, направление которой составляет острый угол с горизонтальной плоскостью. Поверхность жидкости искривится так, что равнодействующая





молекулярных сил будет перпендикулярна касательной к этой поверхности. В случае несмачивания (рис. 94 справа) модуль силы $\vec{F}_2$ больше, чем силы $\vec{F}_1$; равнодействующая $\vec{F}$ направлена внутрь жидкости. Смачивающая жидкость образует у стенки вогнутую, несмачивающая — выпуклую форму поверхности. Только вдали от стенок поверхность жидкости горизонтальна. При достаточно близком расположении стенок друг от друга горизонтальная часть поверхности жидкости совсем исчезает и вся поверхность становится вогнутой или выпуклой, образуя так называемый мениск (луночку).

В капиллярных трубках поверхностное натяжение создает внутри жидкости, под мениском, добавочное давление. Поэтому давление под выпуклой поверхностью больше, а под вогнутой меньше, чем под плоской.

Так как давление под вогнутым мениском меньше в капилляре, чем под плоской поверхностью в сосуде, в который опущен

капилляр, то смачивающая жидкость поднимается в капилляре до тех пор, пока вес столбика жидкости не уравновесит избыток под плоской поверхностью.

СИММЕТРИЯ И ЭНЕРГЕТИКА КРИСТАЛЛОВ

Вы читали книги академика А. Е. Ферсмана «Занимательная минералогия», «Занимательная геохимия», «Рассказы о самоцветах» и др.? Александр Евгеньевич Ферсман широко известен не только как выдающийся ученый — минералог и геохимик, но и как замечательный популяризатор геологических знаний. С теплотой, любовью, энтузиазмом ученого-исследователя написаны все его статьи и книги.

Минералогия в представлении Ферсмана — это наука, которой могут позавидовать науки о живых существах: «На ее основе создается самая замечательная техника, получается металл, извлекается строительный камень — словом, строится все наше хозяйство и промышленность». «Я очень хочу вас увлечь,— пишет он в своей «Занимательной минералогии»,— хочу, чтобы вы начали интересоваться горами и каменоломнями, рудниками и копями, чтобы вы начали собирать коллекции минералов, чтобы вы захотели отправиться вместе с нами из города подальше, к течению реки, где высокие каменистые берега, к вершинам гор или скалистому берегу моря, туда, где ломают камень, добывают песок или взрывают руду. Там всюду мы с вами найдем, чем заняться; и в мертвых скалах, песках и камнях мы с вами научимся читать какие-то великие законы природы, которые управляют всем миром и по которым построен весь мир».

Взгляните на кристаллы и изделия из граненых самоцветов, представленные на рисунке 95. Разве вам не захочется понять, как могла возникнуть эта красота, как образуются эти удивительные произведения природы, разве не появится желание поближе познакомиться с их свойствами? Ведь поразительно красивые кристаллы — это не только украшения; они находят разностороннее применение и в технике. Вы, конечно, слыхали об алмазном бурении, о применении рубинов в часовых механизмах и измерительных приборах, о кристаллах, применяемых в полупроводниковых приборах. А металлы — этот основной ма-


95
A
D
C
E
F
B
96
97


98
99
100

териал современной техники? Знаете ли вы, что все металлы имеют кристаллическое строение? Физик скажет вам, что всякое истинно твердое тело — кристалл. «Почти весь мир кристалличен. В мире царит кристалл и его твердые, прямолинейные законы»,— писал академик Ферсман. Давайте же познакомимся поближе с основными законами кристалла.

Правильная многогранная форма прежде всего бросается в глаза наблюдателю, но не она составляет главную особенность кристаллического тела. Кристалл можно разбить на мелкие кусочки, так что не останется и следа от прежней красоты, и все-таки каждый кусочек будет по-прежнему кристаллом. Самое главное в кристалле не наружная его форма, а своеобразие его внутренних свойств. Но прежде обратим внимание на правильность формы кристалла — на симметрию. По выражению нашего знаменитого кристаллографа Е. С. Федорова, «кристаллы блещут симметрией».

Явление симметрии вам знакомо из многих примеров окружающей жизни. Симметрична бабочка (рис. 96). Форма и окраска правого крыла повторяют очертания и рисунок левого. Когда бабочка сложит крылья, эти рисунки совмещаются. Вам, наверное, приходилось забавляться, получая симметричные отпечатки чернильных клякс при складывании пополам листа бумаги (рис. 97). Симметричны снежинки (рис. 98). У шестиугольной снежинки вы легко обнаружите шесть плоскостей симметрии. Сгибая рисунок по любой из линий, изображающих следы плоскости симметрии снежинки, вы совместите друг с другом две половины ее.

Ось симметрии имеет то свойство, что при повороте вокруг нее на некоторый определенный угол соответствующие части фигуры совмещаются друг с другом. Смотря по тому, на какой угол приходится повернуть при этом тело, различают у кристаллов оси 2, 3, 4, 6-го порядка. Например, у снежинок имеется одна ось 6-го порядка (перпендикулярная к плоскости чертежа). Центром симметрии называется точка внутри тела, на равном расстоянии от которой в диаметрально противоположных направлениях расположены одинаковые элементы тела.

Полезно усвоить эти понятия практически — на моделях кристаллов (рис. 99), изготовленных по прилагаемым выкройкам (рис. 100). Показанный на левом рисунке 99 кристалл при повороте на $1/4$ окружности вокруг оси AB совмещается сам

с собой. Значит, мы имеем ось 4-го порядка. Тот же кристалл совмещается сам с собой при отражении в плоскости *CDEF* (как если бы это была плоскость зеркала); это есть плоскость симметрии.

Модели присталлов можно изготовить из картона (при желании и умении обращаться со стеклом или плексигласом можно изготовить более эффектные модели из этих материалов). Чтобы, не портя книгу, перевести чертеж на картон, пользуются калькой или папиросной бумагой. Перевод с чертежа на картон нужно делать аккуратно, тщательно переведенный на картон чертеж аккуратно вырезают ножницами по периметру. По внутренним штриховым линиям делают неглубокие надрезы (на половину толщины картона). Теперь остается только согнуть выкройку по этим линиям (так, чтобы линии надреза были с наружной стороны) и склеить соприкасающиеся края модели полосками-клапанами.

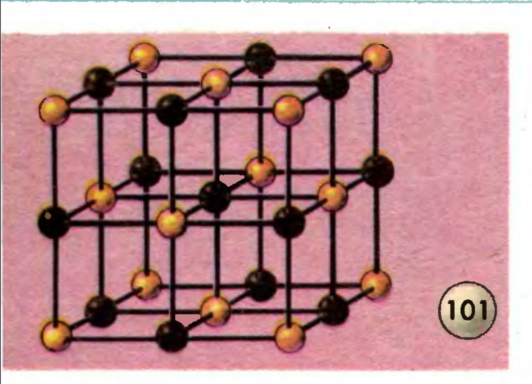
Вторым шагом в изучении кристаллов будет выращивание их из растворов солей. Можно взять для этого раствор поваренной соли, раствор квасцов, раствор медного купороса. В насыщенный раствор каждой из этих солей погружают маленький кристаллик того же вещества, подвешенный на нитке. Так можно вырастить большие кристаллы.

Наши модели являются моделями монокристаллов. Плотные группы мелких, беспорядочно сросшихся кристалликов называют поликристаллами. К последней группе относятся все металлы и их сплавы.

От внешней формы кристаллов обратимся теперь к внутренней структуре их. Внутреннее строение кристаллов представляет собой соединение мельчайших частиц вещества — молекул и атомов — в определенном правильном порядке. Как же узнать о внутреннем расположении частиц, ведь они не видны не только невооруженным глазом, но даже и в лучшие микроскопы? На помощь пришли рентгеновские лучи. Просвечивая ими кристаллы, можно составить точное представление об их внутреннем строении. Работами немецкого физика М. Лауэ, английских ученых отца и сына Брэггов и московского профессора Ю. В. Вульфа установлены законы, позволяющие изучать структуру кристаллов.

И вот тут-то и начинается самое удивительное, самое неожиданное. Само представление о молекуле оказывается поколеблен-

ным, неприменимым к кристаллическому состоянию вещества. Возьмем, например, такое обычное вещество, как поваренная соль. Химики установили состав молекулы соли NaCl. Но в кристалле атомы натрия и хлора не образуют отдельных молекул, а соединяются между собой в определенную конфигурацию, называемую кристаллической или пространственной решеткой (рис. 101). Связь между атомами хлора и натрия электрическая. Можно представить себе дело так, что один из валентных электронов внешней оболочки атома натрия внедряется во внешнюю, не полностью заполненную электронами оболочку атома





хлора. Ведь в атоме хлора на третьей оболочке расположено семь электронов, а для полного числа их должно быть восемь. Но в кристалле каждый ион натрия и каждый ион хлора принадлежат не одной молекуле, а всему кристаллу. Атом хлора одновалентен, т. е. может присоединить к себе только один электрон. В кристалле он окружен шестью атомами натрия, и нельзя сказать, который из них отдаст ему свой электрон. Таким образом, между химическим понятием молекулы NaCl и понятием о ней в кристалле получается расхождение. Весь монокристалл — как бы гигантская молекула.

Следует особо предостеречь читателей от ошибки, в которую иногда впадают, рассматривая пространственную решетку как действительную модель кристалла. Решетка — это лишь условное представление соединения ионов и атомов в кристалле. Шарики в узлах решетки условно обозначают атомы, а линии, соединяющие их, так же условно изображают силы связи (см. рис. 101).

В действительности расстояние между атомами кристалла значительно меньше; кристалл представляет собой плотную упаковку составляющих его частиц (рис. 102). Изображение атомов шарами условно. Шар выбран только потому, что он очень хорошо отражает свойства плотной упаковки. В действительности же происходит не просто соприкосновение, а частичное взаимное перекрывание областей отдельных атомов.

В интересной популярной книге А. И. Китайгородского «Порядок и беспорядок в мире атомов» приведено такое удачное пояснение сказанного: «Напомним, что представление об атомах как о шарах, правильно отражая одно важное свойство — свойство плотно укладываться в плотные кристаллические упаковки, вовсе не исчерпывает сложнейшей природы атомов и не означает, что атомы — просто твердые шарики. Уподобление атома шарику означает по существу следующее: вокруг атома, как центра, мы мысленно проводим сферу такого радиуса, что основная часть электронов данного атома попадает внутрь сферы. Вот и получается шар, который служит, как говорят, моделью атома».

Противоположные электрические заряды, как известно, притягиваются. Когда два иона заряжены противоположно, между ними действуют электрические силы притяжения, являющиеся связующими силами в ионных кристаллах типа поваренной соли. Но если бы мы попытались сблизить два иона так, чтобы электронные орбиты ионов начали перекрываться, то начнут действовать силы отталкивания одноименных зарядов. Правильное пространственное распределение ионов в кристалле соответствует равновесию сил притяжения и отталкивания.

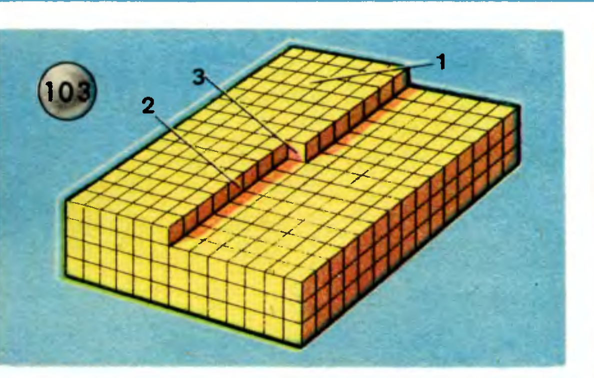
Если существование сил притяжения между ионами с противоположными электрическими зарядами объясняет силы связи в ионных кристаллах, то как объяснить соединение одинаковых атомов в кристаллах, например, алмаза или графита? Оказывается, и здесь атомы соединяются с помощью электронов. У соседних атомов в этих кристаллах появляются общие, так сказать, «коллективные» электроны, которые обращаются вокруг ядер обоих атомов.

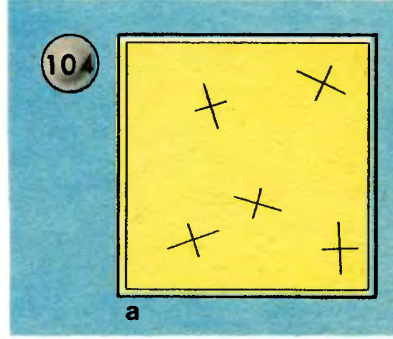
Детальная теория сил при такой связи сложна и относится к области квантовой механики.

В металлах дело обстоит еще сложнее. В этом случае простейшее, но неполное объяснение состоит в том, что металлы,

как известно, легко теряют свои внешние электроны и последние, перемещаясь по всему кристаллу, образуют в нем своеобразный «электронный газ». Эти общие для всего кристалла электроны и создают силы, цементирующие решетку. Правда, объяснение это является упрощенным.

Рассмотрим теперь, как растут кристаллы. Для большей наглядности сравним рост кристалла с постепенным ростом какого-нибудь сооружения из кирпичей (рис. 103). Вот перед нами незаконченная кладка. Если рассматривать каждый кирпич как элементарную ячейку кристалла, то возникает вопрос: куда луч-

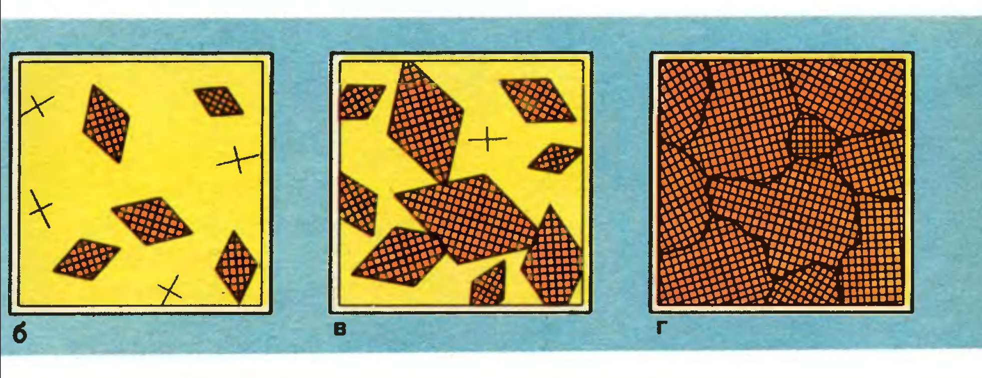




ше положить следующий кирпич? Вот здесь-то и выступают на сцену особенности энергетики кристалла. Кирпичик, положенный сверху, на *1*-й, испытывает притяжение только снизу; если же его положить рядом со *2*-м, то он будет притягиваться с двух сторон; а если положить рядом с *3*-м, то он будет притягиваться с трех сторон. Как известно, при переходе из жидкого состояния в твердое выделяется энергия — теплота плавления или кристаллизации. Количества энергии, выделяющейся в случаях *1*, *2* и *3*, относятся между собой, как 0,06:0,18:0,87. Следовательно, первый способ кладки является энергетически наименее выгодным. Из механики мы знаем, что для большей устойчивости системы ее потенциальная энергия должна быть минимальной, а в этом случае потенциальная энергия уменьшается значительно меньше, чем при укладке по третьему способу. Поэтому сначала достраивается ряд, потом вся плоскость и только потом начинается укладка новой плоскости. Кристалл растет слоя-

ми: пока один слой не достроен, следующий строиться не начинает.

Требование минимума потенциальной энергии выражается также в том, что поверхностная энергия кристалла (поверхностное натяжение в расчете на единицу площади) принимает минимальное значение. Если обломать углы кристалла, то он «залечит свои раны» и снова примет свойственную данному веществу форму. (Отметим также, что поверхностное натяжение является мерой прочности различных кристаллов: у NaCl оно равно 0,15 Н/м, у алмаза 11,4 Н/м.)

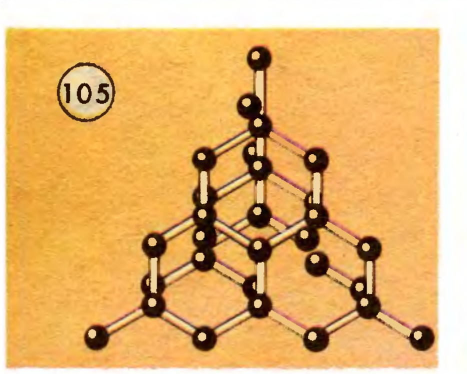


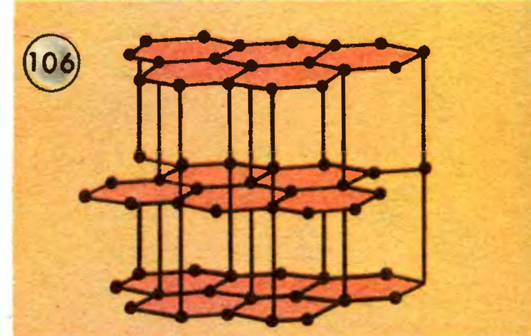
Впрочем, идеальная форма кристалла, отвечающая минимуму потенциальной энергии, представляет собой идеальный случай. В природных условиях такая форма обычно искажается (нарушается) из-за примесей и соседства других кристаллов. В металлах это особенно резко выражено и приводит к образованию мозаичной структуры поликристалла. На рисунке 104 изображены последовательные стадии роста кристалла металла из расплава. Такое же поликристаллическое строение имеют кристаллы льда в узорах, которыми мороз расписывает зимой стекла наших окон.

Обратите внимание, что ледяные иглы в этих узорах ответвляются всегда под одним и тем же углом (60°).

Закон постоянства углов между плоскостями граней — основной закон кристаллографии. Как бы ни был искажен во время роста кристалл, его двугранные углы всегда сохраняют постоянные значения для данного вида кристалла.

Особенности процесса роста кристаллов объясняются также свойством анизотропии, т. е. неодинаковостью физических свойств в различных направлениях. Монокристаллы в разных направлениях неодинаково проводят тепло, неодинаково проводят электричество, неодинаково пропускают свет, обладают неодинаковой прочностью. Если покрыть ровным слоем парафина грань кристалла горного хрусталя, а потом дотронуться нагретой спицей, то парафин расплавится в виде эллипса, а не в виде круга, как это можно наблюдать на аналогичном опыте со стеклянной пластинкой.





Один и тот же химический элемент, с одними и теми же атомами может образовывать кристаллы разных систем с разными кристаллическими решетками. Например, углерод кристаллизуется в виде алмаза (рис. 105) и в виде графита (рис. 106). Решетка графита как бы разделена на слои, которые легко сдвигаются. Когда вы пишете карандашом, то сдвинутые вами чешуйки графита ложатся в виде линии на листе бумаги. Алмаз, наоборот, представляет собой образец максимальной твердости среди минералов.

Ученые все глубже проникают в тайны строения кристаллов и находят им новые применения. Несметно богат минералами наш Советский Союз. Геологи-разведчики в горах, в пустынях, в размывах рек находят все новые и новые минералы для использования в народном хозяйстве страны. Сколько юношей и девушек, увлеченных мечтой познать тайны природы, войдут в ряды энтузиастов горной науки! Быть может, и вы?..

РОЖДЕНИЕ КАЛОРИМЕТРИИ

В старину на Руси сведения о погоде записывали так: «1657 год, Генваря, 30-го дня, пяток. День был до обеда холоден и ведрен, а после обеда оттепелен, в ночи было ветрено». В то время еще не было термометров. Если требовалось отметить температуру воздуха в зимний день, то записывали так: «Мороз мал» или «Мороз лютый».

Первые термометры появились лишь в начале XVII века. Как не похожи они были на наши, современные! Это можно видеть из рисунка 107, на котором изображен первый термометр Галилея, и рисунка 108, на котором изображен первый медицинский термометр. Но и после появления первых термометров еще не было введено понятие о градусе, не установлена начальная точка отсчета температуры.

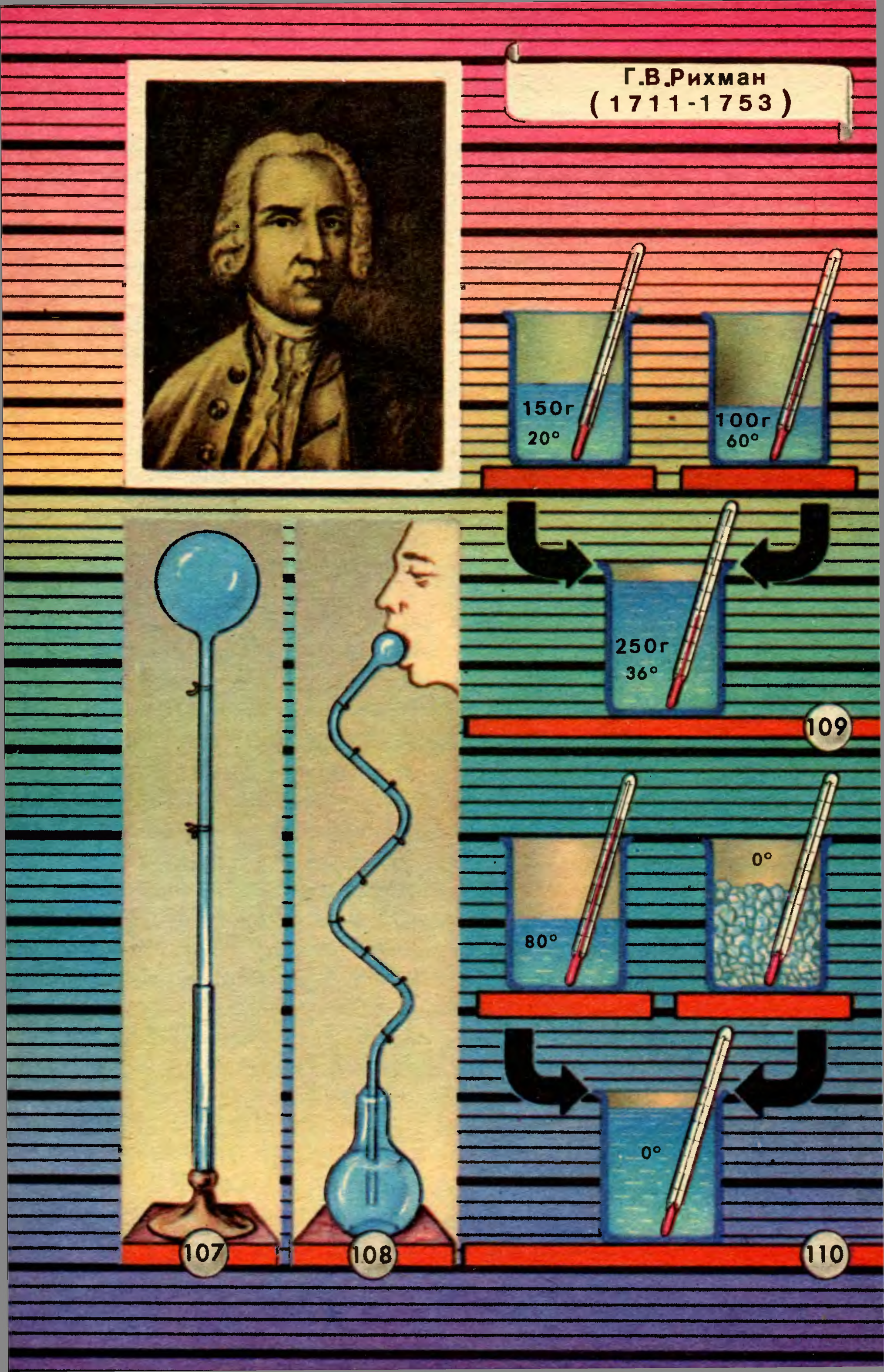
Первое представление о температуре не было достаточно четким, и не всегда понятие «температура» отличали от понятия, получившего название «количество теплоты».

Перенесемся мысленно более чем на два столетия назад в конференц-зал Петербургской Академии наук. 14 декабря 1744 года. На дворе изрядный мороз, оконные стекла покрыты толстым слоем ледяных узоров, но в зале тепло и многолюдно. Присутствует на заседании и Михаил Васильевич Ломоносов. Его коллега и друг, профессор экспериментальной физики Георг Рихман читает доклад на тему «Размышление о количестве теплоты, которое должно получаться при смешении жидкостей, имеющих определенные градусы теплоты». Доклад начинался так: «Милостивые Государи! После того как 12 октября 1744 года в академической конференции было прочитано рассуждение преславного Крафта о тепле и холоде, я исследовал остроумно найденную им формулу для количества или градуса теплоты в жидких смесях...»

Рихман имел в виду найденную Крафтом опытным путем формулу для определения температуры смеси двух порций воды:

$$x = \frac{11\,am + 8\,bn}{11\,a + 8\,b},$$

где a и b — массы этих порций, m и n — их температуры (рис. 109).


Г.В.Рихман
(1711-1753)
150г
20°
100г
60°
250г
36°
109
80°
0°
0°
107
108
110

Рихман показал, что формула Крафта пригодна лишь для небольших порций воды, в противном случае отклонения фактической температуры смеси от расчетной становятся слишком значительными. Рихман предложил свою формулу для определения температуры смеси однородных жидкостей, которая затем перешла в учебники физики под названием «формулы Рихмана»:

$$\Theta = \frac{c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2}{m_1 + m_2}.$$

Следует отметить, что Рихман в отличие от Крафта решил задачу не для двух порций воды, а для любого числа их. Мы привели сокращенную формулу только для двух порций воды.

Однако Рихман согласно господствовавшей в то время теории теплорода считал, что теплота есть некоторая материальная сущность, «тепловая материя», которая равномерно распределяется в данном объеме.

Рихман не разграничивал понятия «температура» и «количество теплоты». Это видно из приведенного вступления к его докладу. И температуру, и количество теплоты он обозначал одинаково: Calor (доклад был написан и зачитывался по-латыни). Не знал Рихман и единицы для измерения количества теплоты. И все же именно работа Рихмана положила начало точным количественным расчетам в области теплотехники. Но чтобы перейти к этим расчетам, надо было сделать еще один шаг. Этот шаг был сделан английским химиком Блэком (1727—1799).

История науки мало знает таких опытов, как следующий опыт Блэка. Согласно формуле Рихмана температура смеси двух равных порций одного и того же вещества, взятых при различных температурах, должна равняться средней арифметической между двумя данными температурами. Если температуры равных порций воды до смешения были 80°С и 0°С, то температура смеси должна быть $\frac{80\,°C + 0\,°C}{2} = 40\,°C$, что и наблюдалось на опыте. Но когда Блэк смешал порцию горячей воды при 80°С с равной порцией льда при 0°С (рис. 110), он, к огромному своему удивлению, увидел, что температура смеси (после таяния льда) получилась не 40°С, а 0°С! «Тающий лед,— писал Блэк,— принимает в себя много тепла, но все действие последнего ограничивается только превращением льда в воду, которая

нисколько не нагревается против бывшей температуры льда. При этом тепло как бы поглощается водой или скрывается в ней и термометр не обнаруживает его присутствия». Процесс плавления льда казался химику Блэку своего рода химической реакцией: лед + теплород = вода.

Вы получите немалое удовольствие и приобретете полезные знания, если повторите этот опыт Блэка, а также проведете следующие опыты.

Опыт 1. Возьмите два одинаковых сосуда. В один положите лед при 0°С, в другой налейте такое же количество воды при 0°С и по термометру наблюдайте за постепенным их нагреванием в комнате (при температуре воздуха около 20°С). Если через 1/4 ч вода нагреется до 4°С (это зависит, конечно, от массы взятой воды, приведенное время лишь примерное), то весь лед растает (т. е. превратится в воду при 0°С) лишь через 5 ч.

Подумайте, как на основании этих данных вычислить теплоту плавления льда.

Опыт 2. (По описанию Блэка.) «Я взял два одинаковых сосуда с плоским дном и поставил их на горячую плиту, налив 8 унций[1] воды при 20°С. Оба сосуда начали кипеть через $3^1/_2$ мин, и через 18 мин вся вода выкипела». Вычислите теплоту парообразования воды.

Вы можете повторить опыт, пользуясь одним сосудом. Постарайтесь объяснить причину расхождения между значением теплоты парообразования воды, вычисленным из опыта и приводимым в учебнике физики.

Опыты Блэка со льдом и водой, естественно, подводили к вопросу: не требуют ли различные вещества для нагревания на одно и то же число градусов различного количества теплоты?

В опыте по определению температуры смеси двух порций воды Блэк одну из порций заменил ртутью и установил, что «ртуть обладает меньшей емкостью по отношению к тепловой материи, чем вода».

Блэк точно разграничивал понятия «количество теплоты» и «температура». Он писал: «Когда мы говорим о распределении теплоты, всегда нужно различать количество теплоты и силу теплоты[2] и не смешивать эти две величины».

---

[1] Напомним, что 1 унция ≈ 28,35 г.

[2] По современной терминологии «... и температуру».

Название единицы количества теплоты «калория» появилось лишь в 1852 году во Франции. В других странах, где метрическая система распространилась позже, термин «калория» появился тоже значительно позднее. В России термин «калория» стали применять лишь в 90-х годах прошлого столетия.

Теория теплорода, ложная в своей основе, сыграла в истории науки и положительную роль: она способствовала развитию учения о тепловых процессах, без чего немыслимо и их техническое использование. Теория теплорода отмерла, но, умирая, она оставила нам терминологию. Прогрессивные в прошлом термины «количество теплоты», «теплоемкость», «скрытая теплота» уже не соответствуют современному взгляду на тепловые процессы как на изменения внутренней энергии тела. Эти термины препятствуют правильному пониманию физической сущности тепловых явлений. Употребляя эти термины, авторы учебников физики обычно разъясняют их условное значение.

Постепенно и калория исчезает из употребления и заменяется другими общепринятыми единицами энергии: джоулями и киловатт-часами[1].

В ЗИМНИЙ ДЕНЬ НА РЕКЕ ЛАРИГАН

— Сегодня я тебе покажу кое-что, Роберт, чтобы решить наш вчерашний спор. Теплород не существует!

— Доказательства, Гемфри!

— За этим дело не станет. Пойдем со мной на реку! Сегодня я видел на реке новую прорубь, и около нее много хороших кусков льда. С ними я проделаю опыт, и ты признаешь мою правоту.

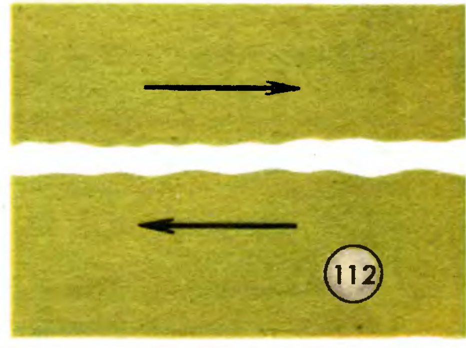
Этот разговор происходил на берегу реки Лариган в один из зимних дней 1795 года между 17-летним Гемфри Дэви и его другом Робертом Данкином. У проруби Дэви выбрал два подходящих куска льда и стал усиленно тереть один о другой. Вскоре, к его восторгу, из-под трущихся поверхностей льдин закапала вода (рис. 111). Когда опыт закончили, льдины плотно смерзлись в один кусок.

---

[1] 1 кал $= 4{,}19$ Дж $= 1{,}16 \cdot 10^{-3}$ Вт · ч.

Несколько лет спустя (в 1799 г.), уже работая химиком в институте пневматики в Клифтоне, Дэви повторил свой опыт в лабораторных условиях. Два бруска льда при помощи особого механизма очень быстро терли друг о друга в течение 1 мин. Температура льда была —1,6°С. Температура воды, образовавшейся в результате плавления льда, оказалась выше температуры окружающего воздуха (1,8°С). Так как теплота извне не поступала, то единственной причиной нагревания поверхностей льдин можно считать только трение. При этом Дэви отмечал, желая отразить возможные возражения, что теплоемкость воды, обра-





зовавшейся из льда, больше теплоемкости льда и, следовательно, вода не может рассматриваться как источник теплоты, растопившей лед. Действительно, из курса физики нам известно, что удельная теплоемкость воды равна 4,2 кДж/(кг • °С), а льда 2,1 кДж/(кг•°С).

Как же объясняет современная физика этот замечательный опыт? Основной причиной трения является неровность соприкасающихся поверхностей. Эти неровности зависят от степени обработки поверхности и от атомно-молекулярного строения вещества. Более точное объяснение дает молекулярная теория.

На рисунке 112 показаны очень хорошо отполированные поверхности при рассматривании их через лупу. Шероховатости, или выступы, препятствуют движению одного тела по поверхности другого. На преодоление этих выступов затрачивается механическая энергия движущегося тела. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию тела. Колебания атомов в узлах кри-

сталлической решетки становятся более интенсивными. В результате решетка разрушается, твердое тело переходит в расплав, например лед — в воду. Внутренняя энергия расплава больше, чем твердого тела, из которого он образовался. Если даже температура расплава, как это было в опыте Дэви, не повысится, то все же можно сказать, что вода при 0°С обладает большей энергией, чем такая же масса льда при 0°С. Почему?

Внутренняя энергия тела слагается из кинетической и потенциальной энергии молекул тела. Кинетическая энергия зависит от скорости движения молекул и обнаруживается в той или иной степени нагретости тела, а потенциальная энергия обусловлена взаимным расположением частиц тела в пространстве.

Молекулы воды, образовавшиеся после разрушения кристаллической решетки льда и находящиеся на большем расстоянии друг от друга, обладают большей потенциальной энергией[1].

Что же стало с мальчиком Дэви, захотите вы узнать, и чем же кончился спор о теплороде?

Дэви стал знаменитым ученым, профессором химии в Королевском институте в Лондоне. Лекции и блестящие опыты принесли Дэви всемирную известность и славу. Аудитория, в которой он читал лекции, всегда была переполнена слушателями. У Дэви учился и начал работать М. Фарадей.

Дэви исследовал действие различных газов и газовых смесей на организм, получил металлический калий и натрий электролизом едких щелочей, считавшихся неразложимыми веществами, получил амальгамы кальция, стронция, бария и магния. Он установил зависимость сопротивления от длины и сечения проводника, отметил зависимость электропроводности от температуры.

Дэви был противником господствовавшей в то время теории теплорода. Тепловые процессы он объяснял движением микрочастиц тела. Исследования химического и теплового действий электрического тока сыграли немаловажную роль в открытии закона превращения и сохранения энергии, окончательно опровергшего теорию теплорода.

---

[1] Увеличение расстояния между молекулами воды по сравнению с расстоянием между молекулами льда доказано рентгеноскопическими исследованиями. Кажущееся противоречие с известным фактом расширения воды при замерзании устраняется современными теориями о структуре воды, согласно которым при плавлении льда молекулы воды собираются в более компактные группы хотя расстояние между отдельными молекулами увеличивается.

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

В механике различают два вида энергии: кинетическую и потенциальную. Но когда говорят об этих видах энергии, то обычно приводят примеры крупных, заметных глазу тел: движущегося поезда, летящего футбольного мяча, поднятого камня. Привыкнув связывать представление об энергии с подобными примерами, довольно трудно бывает перейти к явлениям в мире микрочастиц. Однако движение происходит и во внутреннем мире тела. Так, еще М. В. Ломоносов писал: «Нельзя также отрицать движение там, где глаз его не видит. Кто будет отрицать, что движутся листья и ветви в лесу при сильном ветре, хотя издали он не заметит никакого движения. Как здесь из-за отдаленности, так и в горячих телах, вследствие малости частичек вещества, движение скрывается от взоров».

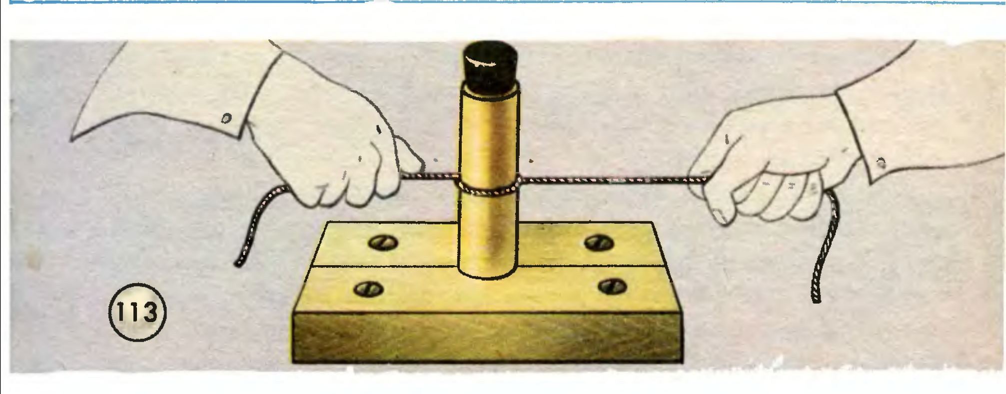
А вот выдержка из трудов известного английского физика и химика Роберта Бойля: «Когда кузнец поспешно выковывает гвоздь или какую-нибудь вещь из железа, металл при этом необыкновенно сильно нагревается, и так как здесь, кроме сильных ударов молотка, ничего особенного не происходит, то эти удары приводят частицы железа в движение; железо, будучи предварительно холодным, делается теплым благодаря внутренним движениям частиц». И дальше: «При вколачивании гвоздя в дерево шляпка его только после большого числа ударов молотка немного нагревается. Но когда гвоздь вбит, то достаточно нескольких ударов, чтобы сильно нагреть шляпку. Действительно, в первом случае каждый удар молотка вгоняет гвоздь в дерево, производя, таким образом, поступательное движение всего гвоздя по известному направлению. Во втором случае, когда движение гвоздя прекратилось, эти удары, не будучи способны ни к тому, чтобы дальше вгонять гвоздь, ни к тому, чтобы разбить его на части, идут только на то, чтобы приводить в движение частицы гвоздя, а это движение и составляет сущность теплоты».

Молекулы находятся в движении, т. е. обладают кинетической энергией. Между молекулами действуют силы взаимного притяжения и отталкивания; молекулы обладают и потенциальной энергией. Подсчитать энергию этого беспорядочного движения огромного множества частиц, а тем более учесть потенциальную энергию каждой из них и всех в целом невозможно, однако ясно, что все эти внутренние движения и внутренние силы

слагаются в какую-то общую сумму, с которой мы и связываем понятие внутренней энергии тела. Внутренней энергией тела называют, таким образом, сумму кинетической и потенциальной энергии его частиц. Измерить можно лишь изменение внутренней энергии, а не всю энергию тела.

Изменение внутренней энергии происходит, например, при нагревании тела. При этом энергия передается от горячего тела холодному.

Другой пример изменения внутренней энергии — изменение агрегатного состояния вещества. При плавлении (отвердевании)



и испарении (конденсации) температура тела не изменяется. Температура льда во время плавления остается 0°C и в том случае, когда сосуд со льдом стоит на горячей плите; вода при нормальном атмосферном давлении кипит при 100°C, и эта температура во время кипения не изменяется. Поскольку температура тела не изменилась, следовательно, не изменилась и кинетическая энергия молекул льда и воды. Подводимая к ним извне энергия превратилась во внутреннюю потенциальную энергию, зависящую от расположения молекул и расстояния между ними.

Изменить состояние вещества можно и без затраты теплоты. Укрепите на столе использованный ружейный патрон, налейте в него воды и закупорьте пробкой (рис. 113). Обмотав патрон несколько раз веревкой, начинайте тянуть веревку за концы то в одну, то в другую сторону. Через некоторое время вода в патроне нагреется, закипит и пар выбросит пробку. В этом примере была затрачена механическая энергия.

В том, что вода обладает большей энергией, чем лед, из которого она образовалась, а пар — большей энергией по сравнению с водой, легко убедиться, определив количество энергии, выделяющейся в процессе затвердевания тела или конденсации пара. Если взять воду при 0°С и пытаться ее охлаждать, то можно заметить, что температура ее меняться не будет, пока вся вода не превратится в лед. Количество энергии, выделяющейся при отвердевании, или, как говорят, количество теплоты, равно 385 Дж на 1 г.

При конденсации 1 г пара при 100°С выделяется количество теплоты, равное 2555 Дж. Теплота, выделяемая при конденсации, играет огромную роль в природе. Когда атмосферный воздух насыщен парами, то при небольшом понижении температуры легко образуется роса и выделяющаяся при этом теплота парообразования, равная 2555 кДж/кг, предохраняет воздух от дальнейшего охлаждения.

Понятие энергии относится всегда к системе тел или частиц тела. Нельзя считать, что потенциальной энергией может обладать какое-нибудь одно тело или одна частица без связи с другими телами и с другими частицами. Нельзя говорить о потенциальной энергии камня безотносительно к Земле. Неверно также полагать, что летящий мяч или снаряд обладает кинетической энергией сам по себе, а не по отношению к какому-нибудь телу. При всяком изменении формы или объема тела изменяется внутренняя энергия тела. Если при этом не изменяется температура (кинетическая энергия частиц), то изменяется потенциальная энергия частиц тела. Обычно одновременно изменяются и кинетическая, и потенциальная энергия частиц тела.

Потенциальная энергия частиц тела изменяется не только при плавлении и парообразовании, но и при раскалывании твердого тела и измельчении в порошок. Затраченная энергия расходуется на разрыв связей между молекулами, т. е. энергия передается ограниченному числу молекул.

Некоторое сходство с этим можно усмотреть в растяжении упругой пружины: энергия, затраченная на преодоление упругих сил, преобразуется в потенциальную энергию частиц растянутой пружины. Точно так же и разъединенные частицы измельченного тела обладают большей потенциальной энергией.

Энергия частиц измельченного тела используется в технике в ряде явлений, объединяемых общим названием «сорбция».

Разорванные внутренние связи создают так называемое «силовое поле поверхности». За счет энергии этого поля происходит активация угля, улавливание таких дорогих растворителей, как ацетон, эфир, процесс флотации (обогащение руд).

Вот несколько вопросов для самопроверки.

1. Во время падения камня с некоторой высоты на землю общая сумма потенциальной и кинетической энергии в любой точке пути остается постоянной. Куда девалась эта энергия, когда камень оказался на земле?

2. Шар, наполненный водородом, поднялся на некоторую высоту и там сгорел. Откуда берется энергия для подъема шара и куда она девается в случае его сгорания?

3. Кусок цинка подвешен на нити в стакане с серной кислотой. Через некоторое время цинк растворился. Куда делась его потенциальная энергия?

В заключение посоветуем прочитать в кчиге «Занимательная механика» Я. Перельмана статью об «энергии растворенной пружины» — она поможет вам разобраться в поставленных вопросах.

Конечно, энергия сгоревшего шара, растворенного цинка, растворенной пружины не могла исчезнуть. Но где она?

«ЧЕРНЫЕ КАМНИ»

В 1298 году была издана «Книга», написанная венецианским купцом Марко Поло. «Книга» была повестью о долгом и опасном путешествии ее автора по Центральной Азии и Китаю. Марко Поло писал: «По всей области Катая[1] есть черные камни, выкапывают их в горах, как руду, и горят они, как дрова. Огонь от них сильнее, нежели от дров, он продержится всю ночь до утра. Жгут эти камни, потому что и дешево, да и дерева сберегаются».

Вы, конечно, догадались, о каких черных камнях писал Поло. Черные камни — это каменный уголь.

[1] Это не описка. «Катай» — так называл Марко Поло Северный Китай, бывший в то время под властью монгольского хана Кублая.

Промышленный переворот XVII века в Англии связан с началом применения каменного угля в металлургии. Лесные запасы Англии не могли удовлетворять требований растущей текстильной и металлургической промышленности. Потребность в машине-двигателе привела к изобретению паровых машин. Основным источником энергии для промышленности стал каменный уголь.

Каменный уголь — продукт глубокого разложения и изменения растительных остатков некогда росших на Земле деревьев, кустарников и др. Деревья и кустарники, произраставшие около 300 миллионов лет назад, во время своего роста и развития поглощали энергию Солнца. Эта энергия и аккумулировалась в пластах каменного угля. Вот почему залежи каменного угля называют кладовыми Солнца.

В состав таких видов топлива, как дрова, торф, каменный уголь, входят одни и те же химические элементы: углерод, водород, азот и кислород. Но процентное соотношение между этими элементами неодинаково. И даже различные сорта каменного угля отличаются друг от друга содержанием в них углерода и примесей других веществ. В таблице 1 приведено процентное содержание указанных выше химических элементов в разных видах топлива.

Таблица 1

Вид топлива	Химический состав, %			
	C	H	O	N
Дрова	50	6	43,9	0,1
Торф	60	5	33,5	1,5
Бурый уголь	70	6	24,2	0,8
Каменный уголь	80	5	13,5	1,5
Антрацит	95	2	2,5	0,5

Различные виды топлива при сгорании выделяют различные количества теплоты. Рассчитанное на 1 кг топлива, это количество называется удельной теплотой сгорания топлива. В таблице 2 указана удельная теплота сгорания некоторых видов топлива.

Таблица 2

Вид топлива	Удельная теплота сгорания, МДж/кг
Дрова	8,4—11
Торф	10,5—15,1
Бурый уголь	10,5—15,7
Каменный уголь	20,9—30,1
Антрацит	26,8—31,4

Поясним таблицу таким примером. 10 спичек имеют массу 1 г. Если теплота сгорания дров 8,4 МДж/кг, то при сгорании одной спички выделяется количество теплоты, равное 0,84 кДж/кг. Коробок спичек (75 штук), сгорев, выделяет немного менее 100 кДж. Примерно такое же количество теплоты выделяется при остывании стакана горячего чая до комнатной температуры. Достаточно одной лопаты каменного угля, чтобы он, сгорая в топке парового котла, обратил в пар 100—150 кг воды. Современные котельные гигантских электростанций, паропроизводительность которых составляет несколько сотен тонн пара в час, потребляют тысячи тонн угля в сутки.

Удельную теплоту сгорания топлива, поступающего на склад большого предприятия, определяют в заводской лаборатории путем сжигания небольшой пробной порции топлива в чистом кислороде в специальном калориметре или по расчетным формулам. В последнем случае предварительно делают химический анализ топлива.

Добыча каменного угля сейчас существенно механизирована. Вместо трудной и опасной работы забойщика в каменноугольных шахтах применяют сложные машины — угольные комбайны. Угольный комбайн вырубает, отбивает, раздробляет в куски пласты и, наконец, подает на транспортер.

Но не утрачивает ли каменный уголь свое значение основного источника энергии в наши дни в связи с развитием гидроэнергетики и в связи с открытием неиссякаемых запасов атомной энергии? Чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить, что каменный уголь не только превосходное топливо, но и сырье для многих химических производств. В результате химической переработки каменного угля можно получить много ценных ве-

ществ, в том числе искусственный бензин, горючие газы, пластмассы, красители, лекарственные вещества.

Длинный ряд превращений испытывает энергия Солнца, поглощенная растениями. Скрытая в залежах древнейших антрацитов, она снова появляется в работе машин, в свете электрических ламп и т. д. Когда вы будете сидеть в теплой комнате и при свете электрической лампы читать увлекательную книгу, вспомните о черном камне, который человек зажег тысячи лет тому назад.

В наши дни мысль ученых все активнее работает над тем, чтобы заменить уголь другими источниками энергии. Строятся атомные электростанции, расширяется сеть гидроэлектростанций. Все большее внимание уделяется воспроизводимым источникам энергии — энергии ветра, морских волн, приливов, а также непосредственно солнечной энергии.

ТРАГЕДИЯ ЮЛИУСА РОБЕРТА МАЙЕРА

Имя Юлиуса Роберта Майера Фридрих Энгельс связывал с одним из трех великих открытий XIX века — открытием механического эквивалента теплоты и доказательством закона превращения и сохранения энергии[1].

Великий естествоиспытатель и врач Роберт Майер, основатель термодинамики — науки, являющейся теоретической основой современной теплотехники, жил в небольшом немецком городке Гейльброне. Конечно, не одним мещанским окружением объясняется личная драма Майера, о которой мы собираемся рассказать. Основная причина — борьба нового со старым, та страстная борьба, в которой новое, прогрессивное одерживает победу над старым, реакционным. Нередко герои в этой борьбе погибают и лишь впоследствии получают заслуженное признание потомков. В истории науки можно найти немало таких примеров. Жизнь Г. Галилея и Р. Майера — наиболее яркие из них. Недаром Дюринг, доцент Берлинского университета, написавший биографию Майера, назвал его «Галилеем XIX столетия».

---

[1] Три великих открытия: закон сохранения и превращения энергии (Майер), клеточная теория строения организмов (Шванн) и теория развития и происхождения видов (Дарвин).

Юлиус Роберт Майер родился в 1814 году. Едва ли скромный владелец аптеки «К розе» мог предполагать, что имя его младшего сына Юлиуса войдет в историю физической науки. Ведь в детстве Юлиус не проявлял особого пристрастия к наукам.

По желанию отца Юлиус поступил в Тюбингенский университет на медицинский факультет. Товарищи любили его за «фейерверк мыслей», за добрый характер. Но «еретический дух» в нем начинал уже сказываться. Как члена запрещенной студенческой корпорации «Вестфалия», Майера арестовали. Возмущенный несправедливостью наказания, Роберт объявил голодовку. Только на пятый день, когда университетский врач сказал, что арестованному грозит душевное расстройство, Майера освободили из заключения, но зато его вскоре исключили из университета. Изучение медицины Майер продолжал в Мюнхене, потом в Вене, и только в 1838 году, когда пришло разрешение вернуться в Тюбинген, он окончил университет со званием доктора медицины.

Однако профессия провинциального лекаря Майера не привлекала. Его заветная мечта — поехать в далекое путешествие. Устроившись врачом на торговое судно, Майер едет на остров Яву. В дороге он ведет дневник.

Момент отплытия им описан так: «Великолепное безоблачное небо со сверкающими звездами, сияющая луна, тихие воды широкого канала, на рассвете открывающаяся панорама покидаемого города — все это придавало воскресному утру какое-то возвышенное, трогательное значение».

101 день в море! Корабль проплывает мимо Португалии, Канарских островов, берегов Южной Америки. Во время путешествия Майер проводил наблюдения над морскими водорослями, различными породами рыб и птиц, цветом моря и неба. Однажды штурман сказал ему, что во время сильной бури вода нагревается. Майер занес замечание штурмана в свой дневник и впоследствии проверил его[1]. С этой путевой записи и зародилась у Майера мысль о связи между теплотой и движением.

Другой факт подтвердил эту мысль. Выполняя обязанности врача, Майер делал переливание крови заболевшим матросам.

---

[1] Читатель может проделать такой опыт: налить в бутылку до половины воды комнатной температуры и, закупорив бутылку пробкой, встряхивать воду в течение нескольких минут. Термометр покажет, что вода нагрелась на 1—2°С.

В порту у берегов Явы он заметил, что кровь матросов значительно светлее венозной крови жителей умеренных поясов. Майер даже подумал, что он случайно вскрыл артерию вместо вены. Но местные врачи объяснили, что такой цвет крови — обычное явление для жителей этих мест. Очевидно, процессы окисления происходят в жарком климате медленнее, так как организму не требуется большого количества теплоты. В письмах к товарищу Майер писал: «Некоторые мысли, пронизавшие меня подобно молнии,— это было на рейде в Сурабае,— тотчас с силой овладели мной и навели на новые предметы».

С этого момента перед нами другой Майер. Он весь поглощен новой идеей, которая становится теперь содержанием его жизни. В письме к другу он пишет: «Наконец, если ты спросишь меня, как я пришел к этому, то вот весь ответ: во время своего морского путешествия я был исключительно занят изучением физиологии и принял новое учение на том достаточном основании, что живо почувствовал потребность в нем».

По возвращении на родину в 1841 году Майер написал статью «Количественное и качественное определение сил». Но физический журнал «Annalen der Physik und Chemie», в который он послал статью, ни в этот, ни в следующий год, ни вообще при жизни Майера не напечатал статью.

Полный энергии и сил, молодой ученый продолжает работать. Написав новый вариант статьи, Майер в 1842 году добился опубликования ее в другом журнале под иным названием: «Замечания о неодушевленных силах природы». Но гробовое молчание ученого мира показало, что никто не обратил внимания на статью «мальчишки», лекаря из Гейльброна. Майеру было тогда 28 лет. Впрочем, горечь неудачи была тогда несколько смягчена другими событиями в жизни молодого доктора. Он полюбил Вильгельмину Клос, дочь коммерсанта, и вскоре женился на ней.

1842 год принес ему «счастье, какому позавидовали бы боги», записывает он в своем дневнике. Увы, мы скоро узнаем, что этот брак явился одной из причин его глубокой личной драмы. Но прежде выясним, что нового дал науке Майер, которого биограф называет «вторым (после Галилея) основателем физики».

Пользуясь современной нам терминологией, коротко можно сказать следующее: Роберт Майер установил количественное соотношение между теплотой и работой и первый вычислил с до-

ступной в то время точностью значение механического эквивалента теплоты, исследовал превращения всех известных в его время видов энергии и сформулировал закон сохранения и превращения энергии. Но не забудем, что слово «энергия» в то время еще не применялось. Основатели этого закона Р. Майер, Д. Джоуль и Г. Гельмгольц в своих работах писали о превращениях силы и о «сохранении силы», подразумевая под словом «сила» энергию! Так, например, потенциальную энергию поднятого над Землей тела Майер называл «силой падения». Закон сохранения энергии он формулировал так: «При всех химических и физических процессах данная сила остается постоянной величиной».

Термин «данная сила» означает данный запас энергии рассматриваемой системы.

В одной из своих работ Р. Майер писал: «Изучить силу в ее различных формах, исследовать условия ее превращений — такова единственная задача физики... В действительности существует только одна единственная сила. В вечной смене циркулирует она и в мертвой, и в живой природе. И там, и здесь нет процесса без изменения формы силы!» Как видим, Майер употреблял слово «сила» в смысле «энергия».

Употребление слова «сила» в смысле причины ускорения (по второму закону Ньютона) и в смысле «энергия», конечно, порождало путаницу и лишало ясности изложение мыслей Майера.

Известно, что для нагревания 1 кг какого-нибудь газа на 1°C не всегда требуется одинаковое количество теплоты. Это количество зависит от следующих условий: будет ли сохраняться постоянным объем данной массы газа (например, нагревать будут в замкнутом нерасширяющемся сосуде) или же газ, свободно расширяясь, будет сохранять постоянным давление. Так, для воздуха удельная теплоемкость при постоянном давлении равна 0,24 ккал/ (кг·°C), а при постоянном объеме она равна 0,17 ккал/ (кг·°C).

В работе «Органическое движение в связи с обменом веществ», изданной в 1845 году, Р. Майер, рассматривая различные энергетические превращения, объяснил, почему теплоемкость газа при постоянном давлении не равна теплоемкости газа при постоянном объеме, и определил механический эквивалент теплоты. Это определение в переводе на современную нам терминологию сводилось к следующему.

При расширении газ совершает работу, например поднимает поршень, на который сверху давит атмосферный воздух. Разность

$$0{,}24\,\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}} - 0{,}17\,\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}} = 0{,}07\,\frac{\text{ккал}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$$

показывает, какое количество теплоты требуется сообщить 1 кг воздуха дополнительно на совершение этой работы.

Представим себе, что 1 $м^3$ воздуха заключен в цилиндрический сосуд с площадью дна 1 $м^2$. Следовательно, высота от дна до нижней плоскости поршня равна 1 м. Масса 1 $м^3$ воздуха при 0°С и давлении 760 мм рт. ст. равна 1,293 кг. Для нагревания этого количества воздуха при постоянном давлении на 1°С потребуется дополнительно 0,07 ккал/(кг • °С) • 1,293 кг • 1°С = = 0,09 ккал на работу по перемещению поршня при расширении воздуха. Эту работу найдем, умножив силу давления газа на путь, пройденный поршнем. Сила давления воздуха на 1 $м^2$ при давления 760 мм рт. ст. равна 101 200 Н. Работа равна $101\,200 \cdot \frac{1}{273}$ Дж, так как высота поднятия поршня согласно закону Гей-Люссака равна $\frac{1}{273}$ первоначальной высоты (при 0°С).

Если при затрачивании количества теплоты 0,09 ккал производится работа, равная $101\,200 \cdot \frac{1}{273}$ Дж, то 1 ккал соответствует (эквивалентна) 4100 Дж[1]. Правда, Майер на основании известных в его время значений теплоемкостей газов получил значительно меньшую величину, а именно 3600 Дж.

Позднее, на основании многочисленных опытов, Джоулем было получено более близкое к современному значение механического эквивалента теплоты. Современное значение механического эквивалента теплоты составляет 4,19 Дж/кал.

С 1848 года начинается особенно тяжелая полоса в жизни Р. Майера: смерть двух дочерей, ссора со старшим братом, нелепое обвинение в шпионаже. Заметка «Важное физическое открытие», написанная Майером и напечатанная в газете, была непонята читателями; разговоры о ней приняли характер травли ее автора. Домашние условия стали невыносимыми, все члены семьи были настроены против Юлиуса.

---

[1] Единица работы — джоуль (Дж) — была введена позднее (в честь Джоуля); во времена Майера использовались другие единицы работы.

В это же время между Р. Майером и Джоулем возник досадный спор о первенстве открытия закона сохранения энергии. Надо отдать справедливость Майеру, он проявил при этом больше корректности и выдержки, но вся эта история еще больше обострила его нервное состояние. Запершись один в комнате, он часами ходил из угла в угол, как волк в клетке: «О, как мучительно болит голова!»

Не в силах выдерживать дольше эти мучения, он решает покончить самоубийством. В мае 1850 года ночью он выбрасывается из окна своей спальни на втором этаже. Он сломал обе ноги, но остался жив.

Попытки опровержения возводимой на него клеветы ни к чему не приводят — газеты их не печатают. Чтобы ответить своим врагам, он написал и выпустил за свой счет брошюру «Замечания о механическом эквиваленте тепла». Это вывело из терпения его жену и тестя. «Хороший семьянин думал бы о том, как материально обеспечить жену и детей, а наш все пишет статейки да издает их за свой счет», — говорит тесть. На семейном совете решают отправить Майера в психиатрическую больницу и лечить там от мании величия. «Ты болен, тебе надо посоветоваться с врачом», — постоянно говорят ему.

Майер дает согласие на лечение в санатории для нервнобольных и в 1852 году едет в Эпинген. Предупрежденные родственниками врачи санатория убеждают Майера отправиться в местечко Ваннենталь для консультации с доктором Целлером. Происходит сцена, подобная той, которая описана Чеховым в рассказе «Палата № 6»: Майера запирают в одиночной камере. Поняв весь ужас положения, в котором он очутился, Майер снимает сапог и в припадке отчаяния колотит им в дверь. «Буйный!» — решили «телохранители» и начали применять соответствующие «лечебные методы».

Тринадцать месяцев, проведенные в доме умалишенных, сломили сопротивление Майера. В 1854 году врач Юлиус Роберт Майер был выпущен на свободу. Прежний «блаженный» стал жить, как все добропорядочные граждане Гейльброна, и даже заниматься врачебной практикой.

Но время не только сломило сопротивление Роберта Майера. Оно принесло, наконец, и признание его заслуг. В Швейцарии Майера избирают почетным членом Общества естествоиспытателей. В Англии признают за Майером приоритет и славу творца

закона сохранения энергии, за что Лондонское королевское общество присуждает Майеру медаль. Во Франции он избирается членом Парижской Академии наук. Поздно! Только в 1862 году Майер смог возобновить свою научную деятельность, но ничем больше не обогатил науку. 20 марта 1878 года Роберт Майер умер от воспаления легких.

САДИ КАРНО И ЕГО ФОРМУЛА

> Если... техника в значительной степени зависит от состояния науки, то в гораздо большей мере наука зависит от состояния и потребностей техники. Если у общества появляется техническая потребность, то она продвигает науку вперед больше, чем десяток университетов.
>
> *(Ф. Энгельс.)*

Если вы хотите найти в истории физики яркий пример взаимного влияния развития науки и техники, то прочтите этот рассказ о молодом французском инженере Сади Карно и его работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Его жизнь и биография очень коротки.

Сади Карно родился 1 июня 1796 года в Париже. Он был сыном Лазаря Карно, математика и французского государственного деятеля, члена Конвента во время французской революции, потом Директории. В 1812 году Сади Карно поступил в Политехническую школу, созданную Конвентом. Эта школа ставила своей задачей подготовку гражданских и военных инженеров, в которых так нуждалась молодая республика. Школа помещалась в бывшем королевском дворце Бурбонов с его сорока залами и большим амфитеатром, была прекрасно обставлена, имела физический кабинет, химическую лабораторию, минералогическую коллекцию и библиотеку. Ее первыми профессорами были лучшие математики и инженеры: Лагранж, Ашет, Прони; Бертолле читал органическую химию. Из Политехнической школы вышла целая плеяда знаменитых математиков, физиков и инженеров. Имена некоторых из них, вероятно, известны вам: Ампер, Араго, Гей-Люссак, Пуассон.

В Политехнической школе с особой тщательностью было по-

ставлено преподавание теоретических дисциплин, в частности математики. Генералы-фронтовики даже «жаловались» на «чрезмерную ученость» выпускаемых из школы военных инженеров. Впоследствии Наполеон делал попытку преобразовать и упростить программу, но он натолкнулся на сопротивление крупнейших профессоров с мировым именем и отказался от своего намерения.

В конце 1814 года Сади Карно окончил Политехническую школу и, получив назначение в инженерные войска, участвовал в защите Парижа. В 1819 году в чине поручика он перешел на службу в Генеральный штаб.

Взгляните на его портрет! Молодой офицер, страстный любитель музыки и вообще искусства, неутомимый спортсмен, фехтовальщик, Сади Карно находил время для занятия науками, историей и политической экономией. С особым увлечением работал он над теорией теплоты. Карно написал единственное, но обессмертившее его имя произведение, которое издал на свои средства в 1824 году под названием «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

«Размышления» — небольшая книжка, в русском издании 1923 года около 60 страниц, но эта работа Карно вошла в сокровищницу мировой науки и поставила ее автора в ряды основоположников термодинамики.

Стимулом для развития термодинамики как науки явились потребности машинной промышленности. Изобретение паровой машины поставило перед наукой задачу — теоретически исследовать работу паровых машин для повышения КПД последних.

Основу термодинамики составляют два закона, или начала. Первое начало термодинамики есть закон сохранения и превращения энергии. В термодинамике этот закон имеет следующий вид:

$$\Delta U = Q + A.$$

Это равенство следует читать так: приращение ΔU внутренней энергии тела равно сумме количества теплоты Q, переданного телу из окружающей среды, и работы A, совершенной над телом внешними силами. Если теплота передается телом в окружающую среду и работа совершается не над телом, а самим телом, то в этом случае Q и A в написанную выше формулу будут входить со знаком «минус» и ΔU будет представлять собой, очевид-

но, не приращение, а убыль внутренней энергии тела. Заметим, что при расширении газ производит работу, связанную с перемещением поршня; обратный процесс, когда работа производится над газом, связан с сжатием газа.

Первое начало термодинамики отрицает возможность создания вечного двигателя (Perpetuum mobile 1-го рода).

Во втором начале термодинамики говорится о направлении, в каком происходят превращения энергии. Согласно второму началу, во-первых, превращение теплоты в работу возможно только при наличии нагревателя и холодильника; во-вторых, в тепловых машинах полезно используется только часть энергии, передаваемой от нагревателя к холодильнику. Математически это выражается формулой для коэффициента полезного действия идеальной тепловой машины:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника, η — коэффициент полезного действия.

Второе начало термодинамики отрицает возможность использования запасов внутренней энергии какого-нибудь источника (например, практически неограниченных запасов внутренней энергии океанов) без перевода части ее на более низкий температурный уровень, т. е. без холодильника (Perpetuum mobile 2-го рода).

Значение первого и второго начал термодинамики для развития техники колоссально. Они предупреждают инженеров и техников от нереальных, фантастических вымыслов, с одной стороны, и указывают им реальный путь усовершенствования машины — с другой.

Тепловые двигатели появились в начале XVIII столетия, в период бурного развития текстильной и металлургической промышленности. Паровая водоподъемная установка была построена англичанами Ньюкоменом и Коули в 1712 году, в России паровой двигатель был предложен Ползуновым в 1765 году, а в 1784 году в Англии Уатт получил патент на универсальный паровой двигатель, внедрение которого имело огромное влияние на развитие промышленности и транспорта.

Паровые машины имели очень низкий коэффициент полез-

ного действия. Карно писал в «Размышлениях», что наилучшие машины имели КПД 5%. Это навело его на мысль исследовать причины столь явного несовершенства тепловых машин и найти пути их усовершенствования.

«Если когда-нибудь, — писал он в начале своей работы, — улучшения тепловой машины пойдут настолько далеко, что сделают дешевой ее установку и использование, то она соединит в себе все желательные качества и будет играть в промышленности такую роль, всю величину которой трудно предвидеть».

В своем исследовании Карно исходил из господствовавшей в то время ошибочной теории, основанной на допущении существования специального «носителя теплоты» — теплорода. Карно рассматривал работу тепловой машины как работу теплорода, производимую при его движении от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Согласно той же теории количество переходящего теплорода не уменьшается. Он писал: «Возникновение движущей силы обязано в паровых машинах не действительной трате теплорода, но его переходу от горячего тела к холодному». И далее: «Недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод; без него теплота стала бы бесполезной. В самом деле, если бы вокруг нас были тела только такие же горячие, как и топка, каким же образом можно было сконденсировать пар? Куда бы его деть, раз он получен? Не следует думать, что его можно, как это практикуется в некоторых машинах, выбросить в атмосферу: атмосфера не приняла бы его. Она принимает его в обычных условиях, потому что выполняет роль большого холодильника, потому что она находится при более низкой температуре. Повсюду, где существует разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы». «Движущая сила падающей воды зависит от высоты падения и количества воды; движущая сила тепла также зависит от количества употребленного теплорода и зависит от того, что можно назвать и что мы на самом деле будем называть высотой его падения, т. е. от разности температур тел, между которыми происходит обмен теплорода. При падении теплорода движущая сила, без сомнения, возрастает с разностью температур между горячим и холодным телом».

Так, несмотря на ложность исходного положения о неуничтожимости теплорода, Карно приходит к правильным выводам

о том, в каком направлении происходит процесс в тепловой машине и каково условие его наиболее выгодного использования.

Далее в книге описан круговой тепловой процесс, в результате которого некоторое количество теплоты переносится от горячего тела к холодному в идеальной тепловой машине.

Пользуясь современным нам языком и современным графическим методом, постараемся передать описание этого теплового процесса, который теперь называется циклом Карно.

Чтобы понять цикл Карно, надо представить себе четыре идеальных прибора, без которых невозможно рассмотреть этот цикл:

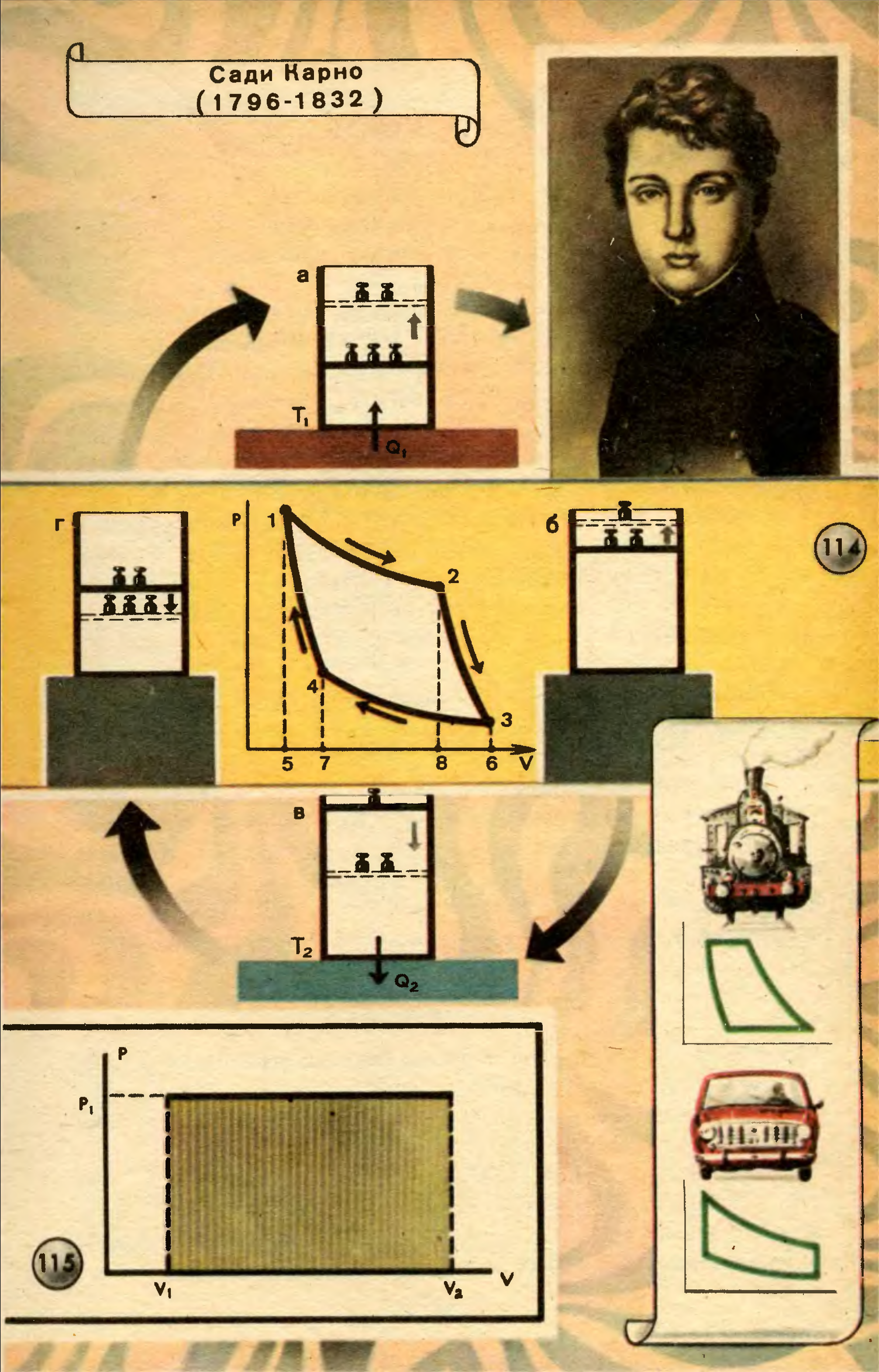
1) Рабочий цилиндр с идеальным газом, закрытый идеально пригнанным, легко, без трения движущимся поршнем, на который положен груз. Поршень и стенки цилиндра совершенно не проводят тепла, дно же цилиндра, наоборот, идеальный теплопроводник.

2) Нагреватель, или «котел»,— тело с неограниченным запасом внутренней энергии, так что отнятие какой-то части ее совершенно не вызывает понижения его первоначальной температуры T_1.

3) «Адиабатическая подставка», т. е. тело с идеальными теплоизолирующими свойствами, не принимающее в себя внутренней энергии другого тела, соприкасающегося с ним («адиабатос» — по-гречески «непроходимый»).

4) Холодильник, т. е. тело, которое может принять в себя неограниченное количество энергии без повышения его температуры T_2.

Поставив цилиндр на нагреватель (рис. 114, *а*), будем постепенно уменьшать давление, снимая с поршня часть нагрузки (расширение). Если бы не приток энергии от нагревателя, то это расширение сопровождалось бы понижением температуры. Но через дно цилиндра переходит некоторое количество теплоты Q_1, благодаря этому температура газа поддерживается постоянной. Вы знаете, что такой процесс изменения состояния газа называется изотермическим. На рисунке 114 он изображен графиком, изотермой *1—2*. Внутренняя энергия газа, поскольку температура не изменяется, остается прежней. Приток энергии от нагревателя лишь возмещает потерю ее на совершение работы поднятия поршня.


Сади Карно
(1796-1832)
а
T1
Q1
г
P
1
2
4
3
5
7
8
6
V
б
114
в
T2
Q2
P
P1
V
V1
V2
115

Затем цилиндр быстро переставляют на адиабатическую подставку (рис. 114, *б*). Если продолжать медленно разгружать поршень, то газ будет продолжать расширяться. Но, не получая пополнения внутренней энергии извне, газ будет расходовать на работу расширения свою собственную энергию и, конечно, охлаждаться. Графически этот процесс представлен адиабатой *2—3*, которая идет круче изотермы.

Когда температура газа понизится до T_2, переносят цилиндр с подставки на холодильник (рис. 114, *в*). Начинают нагружать поршень и, следовательно, сжимать газ изотермически (график *3—4*); при этом газ отдает холодильнику некоторое количество теплоты $|Q_2|$ (мы ставим здесь знак модуля, учитывая тот факт, что $Q_2 < 0$). Оно равно той работе, которую внешние силы произвели над газом в процессе его изотермического сжатия.

Наконец, цилиндр снова помещают на адиабатическую подставку (рис. 114, *г*) и, продолжая нагружать поршень, дополнительно сжимают газ (график *4—1*). Работа этого дополнительного сжатия идет на увеличение внутренней энергии газа; в результате температура газа повышается до исходного значения T_1. Цикл оказывается замкнутым.

Чего же мы добились? Не равен ли расход нашей энергии на сжатие газа энергии, доставленной нам газом в процессе расширения? Ни в коем случае.

Чтобы понять характер превращений энергии в цикле Карно, обратимся предварительно к рисунку 115, на котором изображен график расширения газа при постоянном давлении. Газ действует на поршень с силой $F = p_1 S$, где p_1 — давление газа, S — площадь поршня. Поршень сдвигается на l, в результате чего объем газа увеличивается на $V_2 - V_1 = lS$. Работа, совершенная газом, равна:

$$|A| = Fl = p_1 S \cdot \frac{V_2 - V_1}{S} = p_1 (V_2 - V_1).$$

Эта работа численно равна площади фигуры, ограниченной сверху графиком процесса, изображенного в осях (p, V). График рассматривается на участке от V_1 до V_2; указанная площадь заштрихована на рисунке 115.

Предположим теперь, что в процессе расширения или сжатия газа его давление не остается постоянным. Изотермические и адиабатические процессы, из которых составляется цикл Карно, относятся именно к таким процессам. Однако и в этих случаях

работа определяется площадью фигуры под графиком процесса на соответствующем отрезке оси V. Учитывая это, перейдем к рассмотрению цикла Карно, график которого показан на рисунке 114.

Количество теплоты Q_1, полученное газом от нагревателя в процессе изотермического расширения (график *1—2*), расходуется на совершение работы $|A_1|$, численно равной площади фигуры *5—1—2—8* (см. рис. 114); $Q_1=|A_1|$. Количество теплоты $|Q_2|$, переданное газом холодильнику в процессе изотермического сжатия (график *3—4*), получено за счет совершенной над газом работы A_2, численно равной площади фигуры *7—4—3—6;* $|Q_2|=A_2$. Из рисунка видно, что площадь первой из указанных фигур больше, чем второй, и, следовательно, $Q_1>|Q_2|$. Совершив цикл, газ возвращается в исходное состояние (рассматривается идеальный цикл), его внутренняя энергия оказывается такой же, какой она была в начале цикла. При этом мы выяснили, что в процессе совершения цикла газ получил от нагревателя большее количество теплоты, чем отдал холодильнику. Очевидно, что разность $Q_1-|Q_2|$ и есть та полезная работа, которую может совершить идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно. Коэффициент полезного действия этой машины есть

$$\eta=\frac{Q_1-|Q_2|}{Q_1}=1-\frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

Можно доказать, что

$$\frac{|Q_2|}{Q_1}=\frac{T_2}{T_1}.$$

Тогда предыдущую формулу можно переписать так:

$$\eta=1-\frac{T_2}{T_1}.$$

Это равенство (оно уже приводилось ранее) называется формулой Карно.

Чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника, тем больше КПД машины. Однако стремление все больше и больше повышать этот коэффициент наталкивается на технические трудности.

В реальных тепловых двигателях вследствие различных по-

терь КПД получается значительно меньше, чем это следует из формулы Карно.

Приводим сравнительную таблицу КПД тепловых двигателей (в округленных данных):

Двигатель внутреннего сгорания (дизельный)	около	40%
Двигатель внутреннего сгорания (карбюраторный) . . .	до	35%
Тепловоз		28%
Паровая турбина		25—40%
Реактивный двигатель		25—30%
Паровая поршневая машина	$<$	15%
Паровоз	$<$	9%

Выделяется своим низким КПД паровоз. Поэтому в СССР новые паровозы не выпускаются.

ТЕПЛО И ХОЛОД У НАС ДОМА

— А у нас вчера холодильник установили в комнате...

— Ну и напрасно в комнате, лучше бы в коридоре. В комнате у вас и так холодно, а теперь будет еще холоднее!

— Мама тоже боялась, что так будет, но папа сказал, что от холодильника, наоборот, будет теплее. И знаешь, наверное, так и должно быть: ведь холодильник включают в розетку, как утюг или плитку. Только интересно, откуда же тогда получается холод?

Ну что ж, давайте поможем нашим юным друзьям разобраться в этих недоуменных вопросах. Папа был прав, когда говорил, что от холодильника в комнате будет теплее.

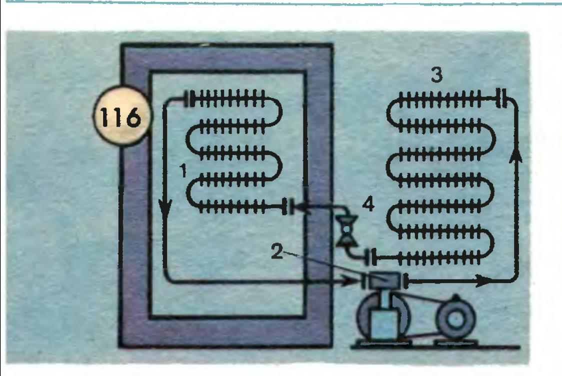
— Что же является источником тепла? — спросите вы.

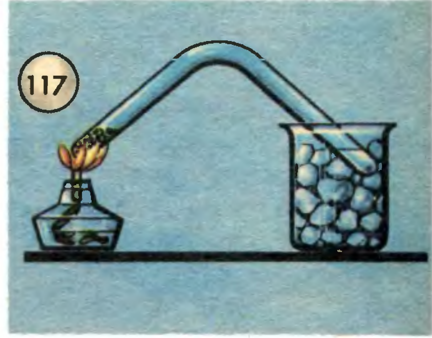
— Охлаждаемые продукты, во-первых, электрический ток, во-вторых.

Физическая основа работы холодильника — испарение некоторых легко испаряющихся жидкостей. Температура испаряющейся жидкости понижается. С молекулярной точки зрения это можно объяснить тем, что жидкость покидают наиболее быстродвижущиеся молекулы и, следовательно, средняя скорость оставшихся молекул уменьшается, а это и есть охлаждение.

Вам знакомо это явление. Выходя после купания в реке на

берег, вы чувствуете охлаждение тела даже в том случае, когда температура воздуха выше температуры воды. Это объясняется испарением воды с поверхности вашего тела. В жаркую погоду можно сохранять холодными воду в графине или сливочное масло в банке. Для этого графин с водой или банку с маслом плотно обертывают влажной чистой тряпкой и ставят на тарелку с водой. Получается простейший холодильник. Для лучшей работы такого холодильника желательно помещать его на сквозняке, тогда вода с тряпки будет испаряться скорее и поэтому будет сильнее охлаждаться.





Чем быстрее испаряется жидкость, тем больше она охлаждается. В холодильниках применяют легко испаряющиеся жидкости, называемые фреонами,— соединения фтора, хлора и углерода. Так называемый фреон-12 кипит при температуре —30°С (при нормальном атмосферном давлении).

Домашние холодильники бывают двух систем: компрессионные (среди них получившие большое распространение холодильники «Саратов», «ЗИЛ») и адсорбционные (например, «Север»).

В компрессионном холодильнике (рис. 116) поршневой компрессор *2*, приводимый в движение электродвигателем, засасывает пары фреона из кожуха компрессора, сжимает их и нагнетает в конденсатор *3*. В конденсаторе — змеевике из труб с ребрами — пары фреона конденсируются и через капиллярную трубку *4* поступают в испаритель *1*. Испаритель представляет собой систему труб, снабженных ребрами. Необходимая для испарения хо-

лодильной жидкости энергия отнимается от стенок испарителя и соприкасающегося с ним воздуха, а следовательно, и продуктов, помещенных в шкаф холодильника. Образующиеся в испарителе пары фреона отсасываются компрессором и снова переходят в конденсатор и т. д. В камере шкафа автоматически поддерживается температура не выше 3°С, необходимая для сохранения продуктов без их замораживания. Включается и выключается электродвигатель при помощи автоматического выключателя — теплового реле, замыкающего или размыкающего цепь тока в зависимости от температуры внутри шкафа.

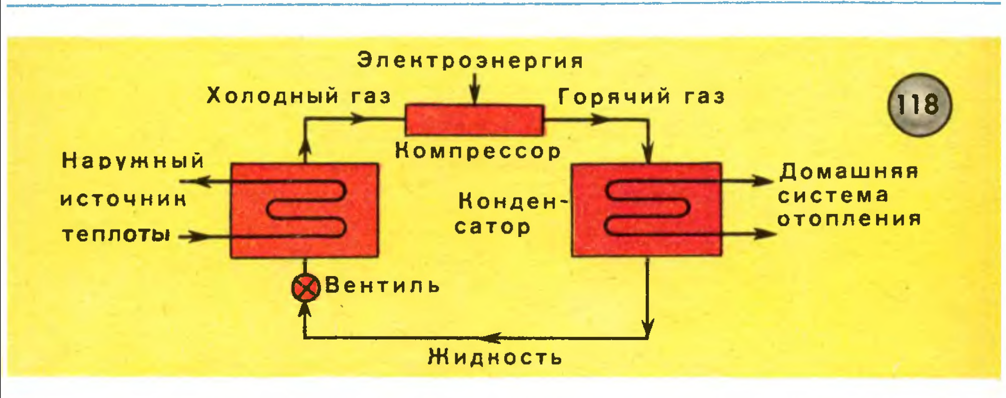
Чтобы понять действие адсорбционного холодильника, вспомним опыт Фарадея по получению жидкого аммиака. В левом колене изогнутой, запаянной с обоих концов стеклянной трубки (рис. 117) находится порошок хлористоаммиачно-серебряной соли, полученной от соединения аммиака с хлоридом серебра. При нагревании это соединение разлагается на составные части. Выделяющийся при этом аммиак создает внутри трубки большое давление. Правый конец трубки опущен в стакан со снегом или толченым льдом. В результате охлаждения газообразный аммиак в правом колене трубки обращается в жидкость. Если теперь убрать и горелку, и лед, то образовавшийся жидкий аммиак начнет испаряться и снова поглощаться (адсорбироваться) хлоридом серебра в левой части трубки. Снова образуется хлористоаммиачно-серебряная соль.

В домашнем холодильнике (например, «Север») происходит подобное явление, но газообразный аммиак образуется из крепкого раствора аммиака, а не из аммиачно-серебряной соли. Раствор аммиака в воде вам хорошо знаком под названием нашатырного спирта. Раствор нагревается или электрическим нагревателем, или газовой горелкой.

У юных физиков, безусловно, вызывает интерес вопрос: каким образом при затрате теплоты получают холод? Вам хорошо известно, что теплота может переходить самопроизвольно только от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Обратного процесса не происходит. Никто не видел, чтобы вода в чайнике, поставленном на холодную плиту или на кусок льда, закипела бы, т. е. чтобы энергия немногих быстрых молекул из огромного большинства медленных молекул холодного тела передавалась воде. Однако такие быстрые молекулы и в холодном теле есть. Передать их энергию телу с более высо-

кой температурой можно, но для этого надо затратить энергию, совершив работу. Это и делается в холодильниках. В компрессионных холодильниках затрачивается механическая энергия электродвигателя, а в адсорбционных холодильниках — внутренняя энергия электрического или газового нагревателя.

В описанных холодильниках внутренняя энергия продуктов, помещенных внутрь холодильного шкафа, передается воздуху помещения, в котором установлен холодильник. Разумеется, воздух помещения в этом случае нагревается слишком незначительно. Однако еще английский физик Томсон показал, что вполне



возможно (и опытные установки подобного рода уже имеются) для отопления жилищ использовать внутреннюю энергию наружного воздуха. Немецкий физик Поль в книге «Механика, акустика и учение о теплоте» описывает подобный «тепловой насос» (рис. 118) и приводит следующий расчет: «Теперь мы согреваем наши жилые помещения электрическими печами. Это исключительно удобно, но не выгодно: мы получаем за киловатт-час электроэнергии только 860 ккал. С точки зрения физики более безупречным был бы другой метод: следовало бы использовать электрическую энергию для «накачки» в дом тепла снаружи. Для этого достаточно было бы 7% электрической энергии, расходуемой обычным образом. К сожалению, тепловые насосы очень громоздки и дороги, поэтому редко употребляются, тем не менее их дальнейшее усовершенствование и распространение крайне желательно для сбережения наших энергетических запасов».

ВБЛИЗИ АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ

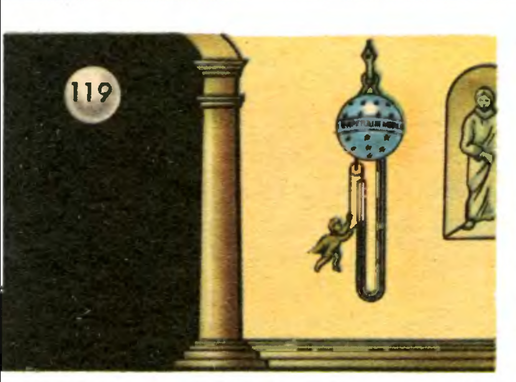
Привычное, знакомое каждому с детства понятие температуры далеко не так просто, и едва ли можно найти другое физическое понятие, определение которого так резко расходилось бы с житейским пониманием этого слова. Определение температуры как степени нагретости тела кажется нам простым и понятным, потому что связано с физиологическим ощущением тепла. Однако понятия «теплый», «холодный», «горячий» весьма относительны.

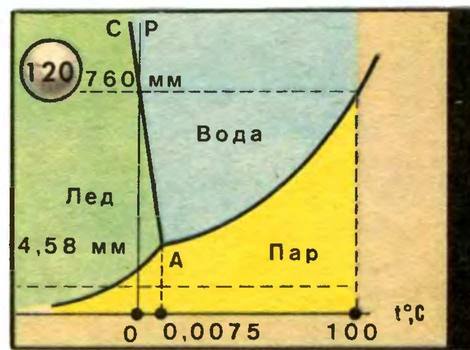
Температура наружного воздуха 0°C воспринимается нами в разное время года по-разному: в январе — как «тепло» (может быть оттепель), а в августе — как «холодно» (может быть заморозок). Измерение температуры связано с установлением теплового равновесия. Если соприкасающиеся тела имеют разную температуру, то происходит передача энергии от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой до момента, когда температуры тел не станут равными. Для установления температурного равновесия требуется некоторое время. Когда измеряют температуру тела человека, то держат термометр под мышкой 7—10 мин. В школе во время лабораторных занятий по физике, измеряя температуру воды, вы тоже выжидаете некоторое время, чтобы температуры воды и термометра сравнялись, и делаете отсчет, не вынимая термометра из воды.

Изобретение первого термометра обычно приписывается Галилею (см. рис. 107). При повышении температуры воздух, находившийся в шарике термометра, расширялся и заставлял воду в трубке опускаться на несколько делений вниз. Вы легко можете изготовить подобный термометр. Вместо шарика можно взять небольшой пузырек от пенициллина с резиновой крышкой, через которую пропущена стеклянная трубочка. Свободный конец трубочки надо опустить в стакан с подкрашенной водой. При легком нагревании пузырька рукой из трубочки выйдет несколько пузырьков воздуха, а при охлаждении пузырька в трубочку поднимется подкрашенная вода. Чтобы этот прибор мог называться термометром, надо позади трубочки прикрепить шкалу.

Вы, конечно, поняли, сколь несовершенен был первый термометр. На его показания влияло не только изменение температуры, но и атмосферное давление. Кроме того, термометр Галилея не имел нулевого деления и градусы были совершенно произволь-

ны, поэтому показания различных термометров были разные. С первой попыткой ввести нуль в термометрическую шкалу мы встречаемся в термометре бургомистра города Магдебурга Отто Герике (рис. 119). Этот термометр состоял из медного шара с U-образной трубкой, в которую был налит спирт. На поверхности спирта в открытом колене плавал поплавок, а от него шла нитка, перекинутая через блок. На конце нитки была подвешена фигурка ангела, державшего в руке палочку, которой он показывал деление шкалы, нарисованной на стене дома. Шар был выкрашен в голубой цвет, на нем были нарисованы звезды и выве-





дена гордая надпись: «Perpetuum mobile». За нуль Герике выбрал температуру того осеннего дня 1660 года, когда был первый заморозок в городе Магдебурге. Термометр Герике имел тот же недостаток, который имел и термометр Галилея, и его можно назвать не термометром, а термоскопом, так как показания зависели от атмосферного давления.

В термометре Реомюра один градус обозначал расширение спирта на 0,001 первоначального объема. За нуль он принял температуру тающего льда. При таком масштабе точка кипения воды соответствовала температуре 80 градусов.

Фаренгейт, желая избежать отрицательных значений температур, принял за нуль градусов наиболее низкую, искусственно достигнутую в то время температуру смеси снега, соли и нашатыря.

Термометр Цельсия первоначально имел такую шкалу: точка кипения воды была принята за нуль, а точка замерзания во-

ды — за 100 градусов. Лишь в 1742 году была введена современная шкала этого термометра.

Из стопятидесятилетней истории создания термометра вы можете сделать вывод, что нуль шкалы, т. е. исходная точка для отсчета температуры, выбрана произвольно; кроме того, на показания термометра большое влияние оказывает выбор вещества, которым заполнена трубочка. Показания термометров с различными заполняющими их жидкостями и газами (спирт, ртуть, гелий, водород, азот) расходятся между собой, и ни одна шкала, несмотря на совершенство изготовления, не может служить абсолютной шкалой температур. Между тем точное определение температуры не должно зависеть от выбора вещества, заполняющего термометр.

В основу «термодинамической шкалы температур», или шкалы Кельвина, положена формула Карно, о которой мы говорили в предыдущей беседе. Эта формула $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ не содержит величин, зависящих от природы вещества. Для определения одной из температур, T_1 или T_2, нужно произвольно выбрать какое-либо значение другой. Определение температуры сводится, таким образом, к определению КПД машины Карно, работающей в данных температурных пределах, и к выбору начальной температуры. Во введенной в СССР с 1 января 1963 года Международной системе единиц (СИ) за единицу для измерения температуры принимается градус Кельвина (К) по термодинамической шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение 273,16 К.

Как понять такое определение? Тройной точкой называется температура, при которой все три состояния, или, как говорят, все три фазы (лед, вода, пар), находятся в равновесии. Не смешивайте эту температуру с точкой плавления льда (0°С) при атмосферном давлении. Тройная точка характеризуется давлением пара в 4,58 мм рт. ст. и температурой 0,0075°С (округленно 0,01°С). Только при этой температуре лед, вода и пар могут находиться при одном давлении. Тройная точка показана на рисунке 120; это точка *А*. А разве при обычном атмосферном давлении над смесью льда и воды нет пара? Есть, конечно, но давление его составляет лишь небольшую часть атмосферного давления и равняется приблизительно 4,5 мм рт. ст. Если мы хотим воду из льда при 0°С и давлении 760 мм рт. ст. превратить в пар такого же давления, то мы должны нагреть ее до 100°С (верхняя

штриховая горизонтальная линия на рисунке 120). При давлении ниже 4,58 мм рт. ст. лед переходит в пар, минуя жидкую фазу.

Разность между температурами какого-нибудь состояния в термодинамической и стоградусной шкалах составит:

$$273{,}16° - 0{,}01° = 273{,}15°.$$

Таким образом, температура исходной точки термодинамической шкалы (абсолютный нуль) по шкале Цельсия (стоградусной шкале) равна:

$$0° - 273{,}15° = -273{,}15°C.$$

В школе мы пишем упрощенно: $T = t + 273$, где T — абсолютная температура (в кельвинах), t — температура по шкале Цельсия (°C).

На уроке физики учащиеся подходят к понятию абсолютного нуля, исходя из молекулярно-кинетических представлений и рассмотрения графиков закона Гей-Люссака или Шарля. При нагревании на 1°C объем газа увеличивается на 1/273 часть первоначального объема при 0°C, если давление остается постоянным, т. е. если газ может беспрепятственно расширяться. Если же газ нагревать в замкнутом, нерасширяющемся сосуде, то будет повышаться в той же мере давление газа. При охлаждении газа на 1°C будет уменьшаться давление на 1/273 часть давления при 0°C. Очевидно, если охладить газ до —273°C, то давление уменьшится до нуля. Так как давление газа вызвано ударами беспорядочно движущихся молекул о стенки сосуда, то по мере понижения его температуры до нуля прекращается тепловое поступательное движение молекул. Охладить — значит замедлить движение молекул. Но нельзя замедлять движение молекул после того, как их движение прекратилось. Температура, при которой прекращается тепловое поступательное движение молекул, называется абсолютным нулем. Мысль о том, что должен существовать такой нижний предел температуры, при котором прекращается тепловое движение молекул, высказывал еще М. В. Ломоносов.

Заметим, однако, что прекращение поступательного движения молекул не означает полного прекращения движения материи: сохраняется вращательное движение молекул, колебательное дви-

жение атомов и еще более мелких частиц. По современным представлениям, даже при абсолютном нуле у частиц остается некоторая энергия, называемая «нулевой энергией».

Сейчас мы увидим, какие новые неожиданные свойства вещества проявляются при температурах, близких к абсолютному нулю.

Первое знакомство с поведением тел при низких температурах началось с тех пор, как Фарадею удалось получить жидкий аммиак, жидкий хлор, углекислый газ. Ученых XIX века поражали свойства сжижаемых газов. При испарении эти сжиженные газы сильно охлаждались, и с помощью их удавалось перевести в жидкое состояние следующий, более стойкий газ. Но некоторые газы, среди них и воздух, не сжижались ни под каким давлением.

В 1860 году Дмитрий Иванович Менделеев пришел к мысли, что для всякой жидкости существует предельная температура, выше которой она может быть только паром или газом, как бы велико ни было внешнее давление. Эту температуру он назвал температурой абсолютного кипения. Через несколько лет ирландский физик Эндрьюс ввел понятие «критическая температура». Чтобы перевести газ в жидкое состояние, его надо охладить до температуры ниже критической. Наконец, в 1882 году польские физики З. Врублевский и К. Ольшевский получили жидкий воздух. В наши дни жидкий воздух нашел очень широкое применение на производстве и в лабораторной практике.

В настоящее время физики достигли столь низких температур, что от абсолютного нуля их отделяет лишь 0,00002°С. При температурах, близких к абсолютному нулю, удалось обратить в жидкое, а затем и в твердое состояние все известные газы. Твердая углекислота, или «сухой лед», который вы, конечно, видали у продавцов мороженого, получается при температуре −73°С (200 К), жидкий азот — при −195,4°С (78 К), жидкий водород — при −253°С (20 К), жидкий гелий — при −268,8°С (4,2 К). Гелий — единственный газ, который не может быть обращен в твердое состояние, если его не сжать до давления $2{,}5 \cdot 10^6$ Па и выше. Именно при исследовании гелия глазам удивленных физиков открылся мир необычайных явлений, противоречащих нашим обычным представлениям о свойствах вещества.

Прежде всего опишем явление «сверхтекучести» гелия, открытое в 1938 году советским академиком П. Л. Капицей. Известно, что всякая жидкость обладает вязкостью, вызываемой трением внутренних слоев текущей жидкости друг о друга. Чем сильнее это трение, тем больше вязкость жидкости. Патока и глицерин — очень вязкие жидкости, вода и спирт отличаются малой вязкостью.

При нагревании вязкость жидкости, как правило, уменьшается, жидкость становится более текучей. Это можно наблюдать по вытеканию жидкости из узких отверстий в сосуде. При охлаждении вязкость жидкости увеличивается.

Но жидкий гелий оказался жидкостью, наделенной необыкновенными свойствами. При температуре 2,18 К жидкий гелий (так называемый гелий-II) внезапно, скачком, совершенно теряет вязкость. В таком состоянии жидкий гелий может свободно протекать через сколь угодно тонкие капилляры, и для поддержания течения такой жидкости нет необходимости в разности давлений между концами участка струи. Гелий в таком состоянии получил название сверхтекучего. Академики Л. Д. Ландау и Н. Н. Боголюбов объяснили явление сверхтекучести, исходя из представлений квантовой физики. Не имея возможности вдаваться в подробности, отметим лишь доступное основное положение их теории.

В отличие от обычных жидкостей и газов в движении частиц сверхтекучей жидкости проявляется высокая степень упорядоченности, вызванная тем, что хаотическое движение частиц при приближении к абсолютному нулю прекращается.

Удивительно и наблюдаемое изменение теплопроводности жидкого гелия. Обычно теплопроводность изменяется параллельно изменению вязкости. При нагревании жидкости вязкость уменьшается и одновременно уменьшается теплопроводность. У гелия же при температуре ниже 2,18 К наблюдается противоположное явление: вязкость внезапно, скачком, уменьшается до нуля, а теплопроводность очень сильно увеличивается. Очевидно, энергия в этом случае передается конвекционными токами, которые легко образуются в условиях сверхтекучести.

Не менее удивительным и неожиданным оказалось явление сверхпроводимости, наблюдаемое при температурах, близких к абсолютному нулю. Присущее всем веществам свойство сопротивления электрическому току у некоторых металлов и со-

единений при сверхнизких температурах пропадает. Электрический ток, проходя через такой проводник, перестает нагревать его, а в замкнутом проводнике ток, однажды возбужденный, продолжает циркулировать неограниченно долго. Это явление было открыто в 1914 году голландским физиком Каммерлинг-Оннесом при исследовании проводимости ртути. Теоретическое объяснение явлению сверхпроводимости дал Н. Н. Боголюбов. Сопротивление электрическому току обусловлено соударением электронов с колеблющимися атомами и ионами металла. При понижении температуры колебания атомов уменьшаются и электроны встречают меньше препятствий на своем пути. При наступлении сверхпроводимости колебания решетки утрачивают беспорядочный характер, вследствие чего упорядочивается движение электронов, чем и объясняется легкость прохождения их через решетку.

Возникает вопрос: могут ли низкие температуры иметь какое-либо практическое значение? Из школьного курса вам известно, что для сжижения газов нужно охлаждать их ниже критической температуры, а критическая температура газов очень низка.

Жидкие газы используются в технике. Например, сжижение воздуха используется для разделения его на составные части: неон, азот, аргон, кислород и др. Полученные таким образом газы нашли широкое применение. Так, кислород в смеси с ацетиленом употребляют для сварки и резки металлов. Большое значение имеет кислородное дутье для ускорения металлургических процессов.

Аргон, неон и другие инертные газы используют для наполнения электрических ламп накаливания, азот используется в химической промышленности.

Жидкий кислород применяют для взрывных работ, при строительстве каналов и т. п.

Жидкий воздух и другие жидкие газы применяются в физических, химических, биологических и других лабораториях для проведения опытов при низких температурах, для улавливания паров воды, ртути и других веществ в целях создания высокого вакуума. Давление наиболее летучего газа — гелия — при температуре 0,1 К равно около 10^{-26} Па. В таком разреженном состоянии в 1 $м^3$ газа содержится всего одна молекула. А в межзвездном пространстве, как предполагают, одна молекула при-

ходится на 1 $см^3$. Таким образом, с помощью низких температур в лабораторной установке достигнуто разрежение, во много раз превосходящее существующее в природе.

«ЛУЧИ ТЕПЛА И ЛУЧИ ХОЛОДА»

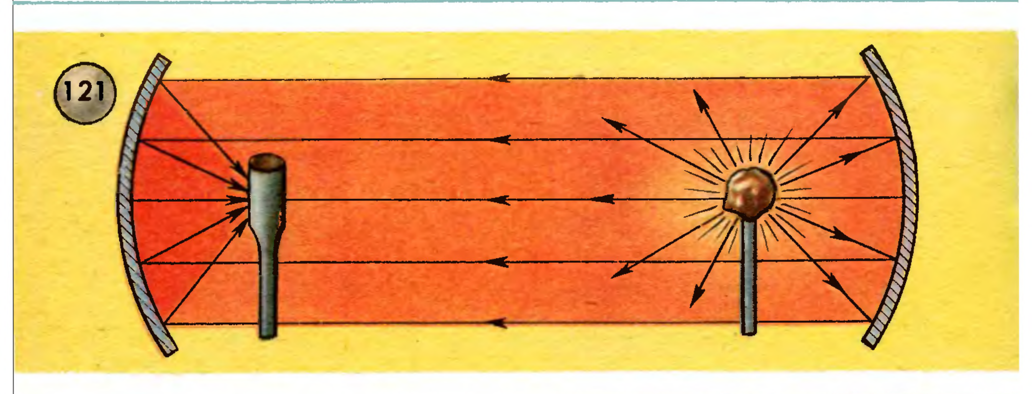
Представьте себя на месте ученых XVII—XVIII веков и попробуйте объяснить следующие опыты. Немецкий ученый Ламберт установил два вогнутых зеркала одно против другого на расстоянии 20 футов (5,1 м). В фокусе одного из них он поместил раскаленные угли (рис. 121), а в фокусе другого легко воспламеняющиеся тела зажигались. «Лучи огня,— писал он в своем сочинении «Пирометрия, или измерение огня и теплоты» (1779 г.),— подчиняются тем же законам, что и световые лучи».

Пикте и Соссюр проделали такой же опыт, но воспламеняющееся тело заменили термометром. Зеркала, какими они пользовались, были сделаны из олова, имели диаметр 30 см и фокусное расстояние около 11 см. «Мы взяли железное ядро двух дюймов ($\approx$5 см) в диаметре, раскалили его так, чтоб оно прогрелось до центра; потом дали ему охладиться до той степени, что оно перестало светиться даже в темноте. Два зеркала были поставлены одно против другого на расстоянии 12 футов ($\approx$365 см) — в фокусе одного мы поместили ядро, в фокусе другого — термометр. Тотчас же температура начала повышаться и в 6 минут поднялась на $10^1/_2$ градусов, тогда как другой, поставленный на таком же расстоянии показывал повышение лишь на 2 градуса».

Чтобы устранить всякое подозрение на то, что термометр нагревается световыми лучами, Пикте взял вместо нагретого ядра сосуд, наполненный кипящей водой; повторив опыт, он обнаружил, что температура в фокусе второго зеркала повысилась больше чем на градус. В течение нескольких десятилетий после этих опытов в физике господствовало убеждение, что от нагретого тела распространяются невидимые лучи теплоты, подчиняющиеся тем же законам распространения и отражения, как и лучи света. Сейчас мы знаем, что это именно и есть лучи света, только света невидимого, не воспринимаемого глазом.

Профессор Хвольсон еще в 1915 г. счел целесообразным написать в журнал «Природа» статью «О несуществующих тепловых и химических лучах». Приводим его слова, имеющие непо-

средственное отношение к нашей теме. Положим, что печь нагрета до 100°С. Всякий нагретый предмет испускает лучи света (электромагнитные волны). Чем ниже температура, тем больше длина волны испускаемого света. Глаз наш воспринимает электромагнитные волны в пределах от 0,4 до 0,76 мкм. При 100°С печь испускает волны значительно большей длины. Проходя в темноте около истопленной печи, мы не видим ее поверхности, но наше тело поглощает эти лучи, и их энергия вызывает ощущение тепла. Невидимые лучи являются здесь промежуточным звеном между теплотой печи и теплотой, которую мы ощущаем.



Ну, а лучи холода? С давних пор известно, что вогнутое зеркало собирает не только свет и тепло, но и холод. В 1553 г. появилась одна из «безумнейших книг» итальянца Порта — «Натуральная магия, или о чудесах природы». Полуавантюрист, полушарлатан Порта среди множества фантастических и нелепых опытов приводит в своей книге и действительные опыты, например опыты с магнитом, с камерой-обскурой, с вогнутыми зеркалами. Описывая последние, он пишет: «Удивления достойно, что, подобно теплоте, и холод отражается: если поместить снег на место отражаемого предмета, то глаз, принимая отражение, ощущает холод, ибо очень чувствителен».

Еще более интересные наблюдения подобного рода были осуществлены членами Флорентийской академии наук (1657—1667 гг.), учрежденной вскоре после смерти Галилея. В одной из глав выпущенного ими труда, названной «Об естественном льде», описан следующий опыт: «...академики поставили во-

гнутое зеркало на значительном расстоянии от глыбы льда в 500 фунтов ($\approx$200 кг) и нашли, что в фокусе зеркала термометр значительно понизился» (рис. 122). Отсюда они сделали заключение, что и холод, подобно теплу, распространяется путем излучения.

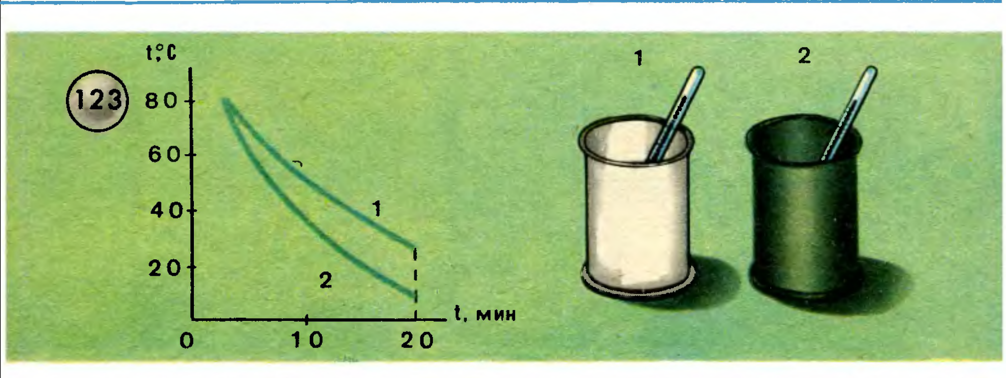
На самом деле лучей холода нет. Опыт со льдом можно объяснить так же, как и опыт с зеркалами Пикте. Между предметами, находящимися в комнате, происходит обмен энергией через посредство электромагнитных волн. Такие волны излучает всякое тело. Также всякое тело поглощает излучения, падающие



на него от других тел. Если при этом тело поглощает больше энергии, чем излучает, то оно нагревается. От нагретого шара в опыте Пикте термометр получал больше энергии, чем сам отдавал. Поэтому температура термометра повышалась. Если, наоборот, тело больше излучает, чем поглощает, то температура тела будет понижаться. Термометр, как тело более нагретое, чем лед в опыте флорентийских академиков, больше излучал, чем поглощал энергии, поэтому ртуть в нем опускалась. Если тело окружено другими телами, имеющими одинаковую с ним температуру, все равно обмен энергией будет происходить, но так как при этом каждое тело получает столько же энергии, сколько отдает, то в этом случае между телами устанавливается тепловое равновесие.

Не следует смешивать излучение с отражением. Белые, блестящие поверхности хорошо отражают падающие на них лучи, но излучают они слабее, чем черные, шероховатые. Вы можете

сделать простой опыт: взять две одинаковые консервные банки, с которых сняты наклеенные на них ярлычки. Одну из них закоптить, другую оставить светлой. Наполните обе банки горячей водой и оставьте охлаждаться — вы увидите, что вода в черной банке остынет скорее (лучше наблюдать с термометром и строить график изменения температуры, рис. 123). Опыт можно проводить и в темноте. Обратный опыт, обнаруживающий различие в поглощательной способности, легко осуществить, наполнив банки холодной водой и выставив их на солнечный свет. Вода в черной банке нагревается скорее.



УГРОЗА ЗАМОРОЗКА

Весенние заморозки — настоящее бедствие не только для плодовых и овощных культур, но даже и для полевых.

Отчего и когда бывают заморозки? Весенние и осенние заморозки бывают от двух причин: от ночного земного излучения и от вторжения значительных холодных масс воздуха из других районов.

С лучами Солнца льется на Землю поток энергии. Подсчитано, что площадка размером 1 см^2, поставленная перпендикулярно солнечным лучам за пределами земной атмосферы, получает в 1 с количество теплоты, равное 8,1 Дж. Это так называемая солнечная постоянная, не зависящая от времени года.

Часть энергии солнечных лучей отражается атмосферой обратно в межпланетное пространство, часть поглощается атмосферой и часть достигает поверхности Земли и поглощается ею.

В среднем за сутки каждый квадратный сантиметр поверхности поглощает около 4 кДж солнечной энергии.

Нагретая Земля в свою очередь излучает энергию. С каждого квадратного сантиметра земной поверхности это излучение составляет в среднем 3 кДж и около 0,5 кДж расходуется на нагревание воды, находящейся на земной поверхности. Получается равновесие между приходом и расходом энергии на Земле (тепловой баланс), и средняя температура Земли остается постоянной (+15°С).

Тепловое равновесие Земли часто нарушается даже в течение суток. Днем, особенно летом, Земля получает больше энергии, чем сама излучает, и поэтому нагревается. Ночью, наоборот, поверхность Земли охлаждается, потому что она получает энергии (от атмосферы, а не от Солнца) меньше, чем излучает. Разность между почвенным и атмосферным излучениями называется эффективным излучением.

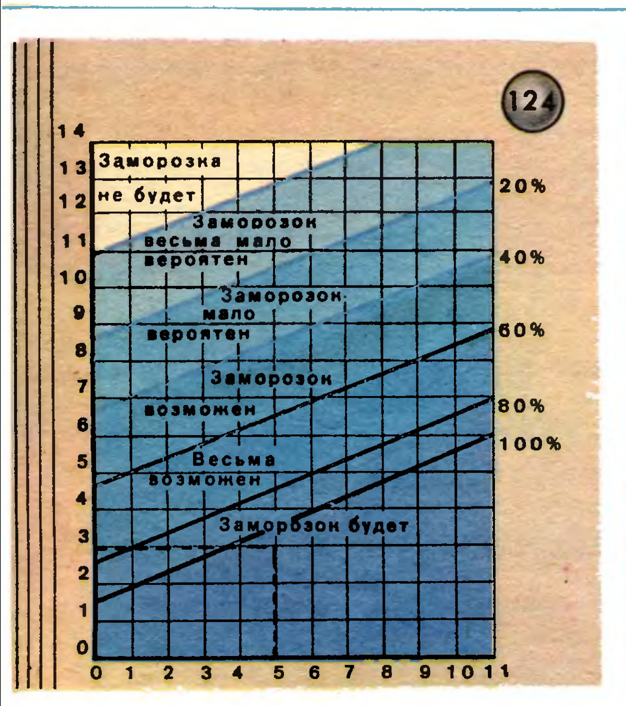
Атмосфера играет огромную роль в сохранении тепла Землей. Днем она пропускает видимые солнечные лучи, а ночью атмосфера как бы прикрывает Землю одеялом — очень сильно задерживает невидимые тепловые потоки, исходящие от поверхности Земли. В этом отношении атмосферу можно сравнить со стеклами оранжереи или парника, пропускающими видимые солнечные лучи, но не пропускающими невидимые, инфракрасные лучи. Не будь атмосферы, температура ночью на Земле всегда понижалась бы на несколько десятков градусов.

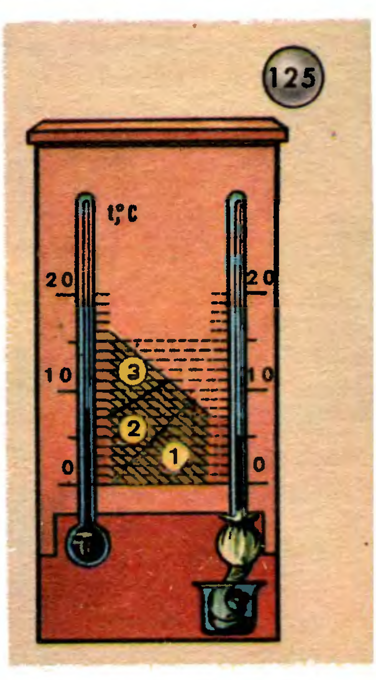
Большое изменение в тепловой баланс Земли вносят облака. Они задерживают лучи. Поэтому в пасмурный летний день прохладнее, чем в ясный. Зато в ясную ночь холоднее, чем в пасмурную. Заморозки могут наступить только в ясную ночь, когда тепловое излучение почвы больше, чем тепловое излучение атмосферы.

Исключительное значение для образования заморозка имеет влажность воздуха. Если влажность велика и воздух близок к насыщению парами, то при понижении температуры воздух может стать насыщенным и начнет выпадать роса. Но при конденсации водяных паров выделяется энергия (удельная теплота парообразования при температуре, близкой к 0°С, равна 2490 кДж/кг). Поэтому воздух у поверхности почвы при образовании росы не будет охлаждаться ниже точки росы и вероятность наступления заморозка уменьшится.

Из сказанного можно сделать такой вывод: вероятность заморозка зависит, во-первых, от быстроты понижения температуры и, во-вторых, от влажности воздуха. Достаточно знать одно из этих данных, чтобы более или менее точно предсказать вероятность заморозка.

По таблице, составленной профессором Броуновым, вероятность заморозка определяется по быстроте понижения температуры. На вертикальной оси (рис. 124) указана температура воздуха в 9 ч вечера, а на горизонтальной оси — разность температур между 1 ч дня и 9 ч вечера. Точка пересечения этих координат окажется в той или иной области графика, по которому и определяется вероятность заморозка. Например, в 1 ч дня температура воздуха была 8°С, в 9 ч вечера температура воздуха равна 3°С. Разность температур составляет 5°С. Вероятность заморозка равна 100%. Заморозок будет.





Влажность воздуха определяется с помощью гигрометра или психрометра.

В учебниках физики описаны устройство этих приборов и методы определения влажности воздуха.

Если к психрометру добавить график, изображенный на рисунке 125, то с помощью такого самодельного прибора можно определить вероятность наступления заморозка. Определяется это так. График разбит на участки, обозначенные цифрами. Если точка пересечения наклонной линии, идущей от показания сухого термометра, с горизонтальной линией, идущей от показания влажного термометра, окажется на участке, обозначенном цифрой *1*, то заморозок неизбежен, если на участке, обозначенном цифрой *2*, то заморозок возможен, и если на участке, обозначенном цифрой *3*, то заморозка не будет.

Пример. Температура воздуха (показание сухого термометра) 10°C, показание влажного термометра 7°C. Точка пересечения наклонной линии, идущей от 10°C, с горизонтальной линией, идущей от 7°C, находится на участке, помеченном цифрой *2*. Следовательно, заморозок возможен.

СОДЕРЖАНИЕ

Михаил Иванович Блудов

БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ

Часть I

Заведующая редакцией
Н. В. Хрусталь

Редактор
В. А. Обменина

Художник
С. Ф. Лухин

Художественный редактор
В. М. Прокофьев

Технический редактор
В. Ф. Коскина

Корректоры
Н. В. Красильникова
и Н. С. Соболева

ИБ № 6949

Сдано в набор 10.05.83. Подписано к печати 13.03.84. А12169. Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Бумага офсетная № 2. Гарнитура обыкновенная новая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13+форзац 0,25. Усл. кр. отт. 53,5. Уч.-изд. л. 12,97+форзац 0,45. Тираж 323 000 экз. Заказ № 2222. Цена 65 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Калининский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.



Посадка на Венеру спускаемого аппарата «Венера-12»

1 — межпланетная станция на орбите Венеры;
2 — разделение спускаемого и орбитального аппаратов;
3 — вход спускаемого аппарата в атмосферу Венеры;
4 — раскрытие вытяжного парашюта;
5 — отстрел крышки аппарата;
6 — раскрытие тормозного парашюта (высота около 60 км);
7 — отстрел парашюта и нижней части теплозащитной оболочки (высота 48 км);
8 — посадка аппарата. Передача информации на Землю.